

Historia, Evolución y Perspectivas de Futuro en la utilización de técnicas de simulación en la Gestión Portuaria: Aplicaciones en el análisis de operaciones, estrategia y planificación portuaria.

Ignacio de la Peña Zarzuelo

Tesis doctoral

Universidade da Coruña

2018



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Historia, Evolución y Perspectivas de Futuro en la utilización de técnicas de simulación en la Gestión Portuaria: Aplicaciones en el análisis de operaciones, estrategia y planificación portuaria.

Ignacio de la Peña Zarzuelo

Tesis doctoral UDC / 2018

Directora: María Jesús Freire Seoane

Tutora: María Jesús Freire Seoane

Programa Oficial de doctorado en Análisis Económico y
Estrategia Empresarial

Área de Ciencias Sociales y Jurídicas
Facultad de Economía y Empresa



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

La abajo firmante hace constar que es la directora de la Tesis Doctoral titulada **“Historia, Evolución y Perspectivas de Futuro en la utilización de técnicas de simulación en la Gestión Portuaria: Aplicaciones en el análisis de operaciones, estrategia y planificación portuaria”**, realizada por Ignacio de la Peña Zarzuelo en la Universidade da Coruña (Área de Ciencias Sociales y Jurídicas de la Facultad de Economía y Empresa) en el marco del Programa Oficial interuniversitario (UDC, USC e UVigo) de doctorado en Análisis Económico y Estrategia Empresarial, dando su consentimiento para que su autor proceda a su presentación y posterior defensa.

A abaixo asinante fai constar que é a directora da Tese Doutoral titulada **“Historia, evolución e perspectivas futuras no uso das técnicas de simulación en xestión portuaria: Aplicacións na análise das operacións, estratexia e planificación portuaria”**, desenvolta por Ignacio de la Peña Zarzuelo na Universidade da Coruña (Área de Ciencias Sociais e Xurídicas da Facultade de Economía e Empresa) no marco do Programa Oficial Interuniversitario (UDC, USC e UVigo) de Doutoramento en Análise Económica e Estratexia Empresarial, dando o seu consentimiento para que o seu autor proceda a súa presentación e posterior defensa.

A Coruña, 18 de Abril de 2018.

Directora:

Dra. María Jesús Freire Seoane

Doctorando:

Ignacio de la Peña Zarzuelo

No importa que lejos esté la meta,
el tiempo o lo que cueste llegar a ella;
lo importante es que tengas ganas de alcanzarla, dediques tus esfuerzos a conseguirlo y tengas
buena compañía en el camino.

Gracias

A Inés, por su incondicional compañía, cariño y comprensión. Siempre está ahí.
A mis padres, Antonio (d.e.p.) y Pilar, cuyos valores transmitidos han sido esenciales para
terminar este trabajo y porque me dieron la mejor de las herencias; mi educación y su ejemplo.
A mis hijos Iñigo, Jaime y Miguel, siempre ilusionados por que terminara este proyecto y
quienes han servido como incentivo final para hacerlo. ¡Ellos sí que son un buen proyecto!

A mi Directora de Tesis, María Jesús, quien me motivó para concluir un trabajo que llevaba sin
acabar desde hace 20 años; y a Javier quien me introdujo en el mundo de la investigación. Con
la primera lo terminé, con el primero lo comencé.

A todos mis “maestros”, en el colegio, Universidad y mundo profesional.

A mis hermanos, amigos y compañeros de estudios y trabajo. He tenido mucha suerte en la vida
con todos ellos.

A todos los que me han ayudado o a los que han animado a que continuase hasta el final.

Resumen

Las técnicas de simulación, tal y como hoy las conocemos, comenzaron a mediados del siglo XX; primero con la aparición del primer computador y el desarrollo del método Monte Carlo, y más tarde con el desarrollo del primer simulador de propósito específico conocido como GPS y desarrollado por Geoffrey Gordon en IBM y la publicación del primer texto completo dedicado a esta materia y llamado *the Art of Simulation* (K.D. Tocher, 1963).

Estas técnicas han evolucionado de una manera extraordinaria y hoy en día están plenamente implementadas en diversos campos de actividad.

Las instalaciones portuarias no han escapado de esta tendencia, especialmente las dedicadas al tráfico de contenedores.

Efectivamente, las características intrínsecas de este sector económico, le hacen un candidato idóneo para la implementación de modelos de simulación con propósitos y alcances muy diversos.

No existe, sin embargo y hasta lo que conocemos, un trabajo científico que compile y analice pormenorizadamente tanto la historia como la evolución de simulación en ambientes portuarios, ayudando a clasificar los mismos y determinar cómo estos pueden ayudar en el análisis económico de estas instalaciones y en la formulación de las oportunas estrategias empresariales.

Este es el objetivo último de la presente tesis doctoral.

Resumo

As técnicas de simulación, tal e como hoxe as coñecemos, comezaron a mediados do século XX; primeiro coa aparición do computador e o desenvolvemento do método Monte Carlo e máis tarde co desenvolvemento do primeiro simulador de propósito específico coñecido como GPS e desenvolvido por Geoffrey Gordon en IBM e a publicación do primeiro texto completo dedicado a este tema chamado “A Arte da Simulación” (K.D. Tocher, 1963).

Estas técnicas evolucionaron dun xeito extraordinario e hoxe en día están plenamente implementadas en diversos campos de actividade.

As instalacións portuarias non escaparon desta tendencia, especialmente as dedicadas ao tráfico de contenedores.

Efectivamente, as características intrínsecas deste sector económico, fanlle un candidato idóneo para a implementación de modelos de simulación con propósitos e alcances moi variados.

Con todo, e ata o que coñecemos, non existe un traballo científico que compila e analiza de forma detallada tanto a historia como a evolución da simulación en estes ambientes portuarios, clasificando os mesmos e determinando como estes poden axudar na análise económica destas instalacións e na formulación das oportunas estratexias empresariais.

Este é o último obxectivo da presente tese doutoral.

Abstract

Simulation, to the extent that we understand it nowadays, began in the middle of the 20th century; first with the appearance of the computer and the development of the Monte Carlo method, and later with the development of the first specific purpose simulator known as GPS developed by Geoffrey Gordon in IBM. This author published the first full text devoted to this subject “*The Art of Simulation*” in 1963.

These techniques have evolved in an extraordinary way and nowadays they are fully implemented in different fields of activity.

Port facilities have not escaped this trend, especially those dedicated to container traffic.

Indeed, the intrinsic characteristics of this economic sector, make it a suitable candidate for the implementation of simulation with very different purposes and scope.

However, to the best of our knoweledge, there is not a scientific work that compiles and analyzes in detail both, the history and the evolution of simulation in port environments, contributing to classify them and determine how they can help in the economic analysis of these facilities and in the formulation of different business strategies.

This is the ultimate goal of this doctoral thesis.

Índices y Glosarios

Índice de Contenidos

Resumen	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índices y Glosarios	vii
Índice de Contenidos.....	ix
Índice de Tablas	xxiii
Índice de Ilustraciones	xxx
Lista de Acrónimos	lv
Introducción.....	lxiii
Motivos y organización del estudio.....	lxiv
Finalidades y Objetivos de la tesis doctoral.....	lxvi
Metodología	lxvii
Proceso de recopilación bibliográfica	lxvii
Método de organización histórico.....	lxviii
Método de organización sectorial	lxviii
Prólogo	1

Capítulo 1.....	5
Introducción a la Simulación: Conceptos Básicos y evolución Histórica	5
1.1 Concepto de modelización, su proceso y calibrado.	6
1.2 Breve historia de la simulación.	8
1.2.1 Los orígenes de la simulación.	8
1.2.2 Primer lenguaje de simulación: GSP (1958) (“ <i>General Simulation Program</i> ”).....	9
1.2.3 Sistemas Dinámicos. Lenguaje de simulación DYNAMO (1959).	11
1.2.4 GPSS (1961) (General Purpose Simulation System).....	16
1.2.5 SIMULA (1961) y el Norwegian Computing Centre. Orígenes de la programación orientada a objetos.....	19
1.2.6 Simulación basada en FORTRAN: SIMSCRIPT, GASP, SLAM y SIMAN.	24
1.2.7 El Winter Simulation Conference y el periodo de expansión científica.	29
1.3 Estado actual del arte: herramientas y clasificación.....	31
1.3.1 Clasificación funcional de modelos: Deterministas versus Estocásticos, Estáticos <i>versus</i> Dinámicos, Discretos <i>versus</i> Continuos.	31
1.3.2 Clasificación de modelos conforme el paradigma de simulación: DES, ABS y SD.	35
1.3.3 Lenguajes de programación, lenguajes de simulación y paquetes de simulación.	44
1.3.3.1 Lenguajes de programación, lenguajes de simulación y paquetes de simulación. Introducción.	44
1.3.3.2 Lenguajes de programación.....	45
1.3.3.3 Lenguajes de simulación.	48
1.3.3.3.1 Lenguaje de Simulación <i>SLX</i>	49

1.3.3.3.2	Lenguajes de Simulación herederos de SIMSCRIPT: MODSIM, SIMFACTORY II.5, NETWORK II.5, LANNET II-5 y COMNET II.5.	50
1.3.3.3.3	Lenguaje de Simulación <i>CSIM</i>	52
1.3.3.4	Simuladores o paquetes de simulación.	53
1.3.3.4.1	Simuladores comerciales. Introducción.	54
1.3.3.4.2	Simuladores comerciales. Breve descripción.	55
1.3.3.4.2.1	ARENA®.	55
1.3.3.4.2.2	ExtendSIM®.	56
1.3.3.4.2.3	Taylor II y Enterprise Dynamics (ED).	57
1.3.3.4.2.4	Visual SLAM / Awesim.	59
1.3.3.4.2.5	SIMIO®.	60
1.3.3.4.2.6	FLEXSIM® (FLExible SIMulation).	61
1.3.3.4.2.7	PROMODEL (previamente ProMod).	62
1.4	Conclusiones y descripción histórica de herramientas de simulación.	63
	Bibliografía.	69

Capítulo 2.....	105
Uso de modelos y simulación en entornos portuarios: evolución y clasificación	105
2.1 Introducción a la modelización portuaria. Simulación versus procedimientos analíticos.....	106
2.2 Clasificación “macro” de modelos portuarios.	109
2.2.1 Modelos portuarios por su grado de especialización. Modelos de propósito especial y modelos de propósito general aplicados en entornos portuarios.	111
2.2.2 Modelos portuarios por la tipología de modelización. Lenguajes de programación, lenguajes de simulación y simuladores en entornos portuarios.	112
2.2.3 Modelos portuarios por su propósito. Modelos operacionales, tácticos y estratégicos. .	113
2.2.4 Modelos portuarios por su grado de integración. Modelos integrados <i>versus</i> modelos no integrados.	114
2.2.5 Modelos portuarios por el paradigma de programación. Paradigmas de simulación "DES", "ABS" y "SD" en ambiente portuario. Aplicación y ejemplos.	116
2.3 Modelos de propósito especial diseñados para entornos portuarios.....	120
2.3.1 Introducción a los modelos de propósito especial portuario.	120
2.3.2 Los orígenes del modelo UNCTAD (PORTMODEL, 1969).	124
2.3.3 Los orígenes del modelo del Banco Mundial (PORTSIM, 1974).	129
2.3.4 Los orígenes del modelo general de simulación de control de operaciones portuarias (MIT Port Simulator, Frankel 1987).	133
2.3.5 Modelos Portuarios en el Campo Militar.	142
2.3.6 Otros modelos de propósito especial para modelizar entornos portuarios. Situación actual. Software comercial especializado en terminales de contenedores.	146
2.3.6.1 Modelos de diseño de layout CMLD: Variantes CRAFT y ALDEP. .	146

2.3.6.2	Desarrollo de modelos portuarios usando software comercial de propósito especial.	150
2.4	Modelos de propósito general en puertos: Visión especializada, integrada y conjunta.....	161
2.4.1	Introducción.	161
2.4.2	Clasificación de subproblemas de simulación portuaria de propósito general.	164
2.4.2.1	Enfoque especializado o de resolución aislada de problemas de planificación portuaria usando modelos simulación.	164
2.4.2.2	Visión integrada simple o de resolución combinada de problemas de simulación en entornos portuarios.	178
2.4.2.3	Visión global o de resolución conjunta de problemas de planificación portuaria usando modelos simulación.	181
2.4.3	Algoritmos de programación utilizados en los modelos <i>ad hoc</i> portuarios.....	184
2.4.4	Utilización de software comercial de propósito general en ambientes portuarios.....	195
2.4.4.1	Introducción.....	195
2.4.4.2	Aplicaciones prácticas de utilización de software comercial de propósito general en ambientes portuarios.	196
2.5	Comparación de resultados: formulaciones analíticas <i>versus</i> modelos de simulación.	202
2.6	Conclusiones.	209
	Bibliografía.	212

Capítulo 3.....	297
Entornos de simulación (paradigmas DES, ABS y SD), emulación y modelos físicos en puertos y terminales marítimas.	297
3.1 Introducción.	298
3.2 Simulación mediante eventos discretos o “DES”.	299
3.2.1 Conceptos básicos de utilización de técnicas DES en puertos.	300
3.2.2 Utilización de técnicas DES en entornos portuarios. Estudios recopilatorios y recorrido histórico.	303
3.3 Simulación mediante técnicas basadas en agentes o ABS.	305
3.3.1 Antecedentes de utilización de técnicas ABS en puertos.	306
3.3.2 Utilización de técnicas ABS en puertos: recopilación de referencias bibliográficas y alcance de las mismas.	308
3.3.3 Enfoque integrado y de resolución aislada de problemas utilizando técnicas ABS.	339
3.3.4 Software para la realización de simulaciones ABS en entorno portuario.	341
3.4 Simulación mediante técnicas basadas en sistemas dinámicos o SD.	345
3.4.1 Aspectos generales de SD en puertos y clasificación general atendiendo al objetivo del estudio.	345
3.4.1.1 Análisis de operación en terminales y contextos portuarios utilizando SD.	347
3.4.1.2 Análisis económicos portuarios y previsiones de tráfico utilizando modelización SD.	369
3.4.1.3 Industria marítima, fletes y astilleros utilizando modelización SD.	379
3.4.1.4 Análisis de riesgos y planes de contingencia utilizando modelización SD.	380

3.4.1.5	Análisis de impacto de los puertos y/o su relación con su hinterland utilizando modelización SD.	382
3.4.1.6	Otros criterios de clasificación de modelos SD en puertos.	402
3.4.2	Software para la realización de simulaciones SD en entorno portuario.	412
3.5	Criterios para la selección de herramientas de simulación.....	419
3.6	Modelos de emulación en puertos y <i>Terminal Operating System</i> (“TOS”)	421
3.7	Modelos de simulación física en puertos: prototyping.	427
3.8	Conclusiones.	437
	Bibliografía.....	439

Capítulo 4.....	503
Modelos de simulación en diferentes clases de terminales	503
4.1 Introducción.....	504
4.2 Simulación en terminales de graneles sólidos.	506
4.2.1 Introducción.	506
4.2.2 El mercado de graneles sólidos y su relevancia en el contexto marítimo portuario.	507
4.2.3 Las operaciones en terminales de graneles sólidos. Descripción de equipamiento.	513
4.2.4 Revisión bibliográfica de trabajos de simulación y modelización en terminales de graneles sólidos.	519
4.2.4.1 Descripción cronológica de los estudios publicados sobre graneles sólidos.	519
4.2.5 Resumen de trabajos por año de publicación, temática y herramienta.	569
4.2.6 Conclusiones y futuros campos de actividad en el campo de modelización de terminales de graneles sólidos.	575
4.3 Simulación en terminales de graneles líquidos	577
4.3.1 Crudo de petróleo y productos petrolíferos.	578
4.3.2 Simulación en terminales de GNL.	588
4.3.2.1 El tráfico de GNL en el contexto marítimo – portuario.	588
4.3.2.2 El mercado de GNL y su cadena logística.	589
4.3.2.3 Revisión bibliográfica de modelos de simulación en terminales de GNL.	598
4.3.2.3.1 Resumen de estudios de simulación sobre la cadena del GNL y clasificación por temática cubierta, técnica utilizada y base experimental implementada.	598

4.3.2.3.2	Descripción cronológica de los estudios de simulación sobre la cadena del GNL.....	602
4.3.2.4	Conclusiones y futuros campos de investigación en la simulación y modelización de terminales de GNL.	618
4.3.3	Otros graneles líquidos.....	620
4.4	Terminales Ro-Ro, de vehículos y pasajeros.....	624
4.4.1	Terminales Ro-Ro de mercancía.	624
4.4.2	Terminales de vehículos.	647
4.4.3	Terminales de <i>ferries</i> y cruceros.	660
4.5	Terminales polivalentes: multipropósito y de carga general fraccionada.....	666
4.5.1	Caracterización de terminales polivalentes. Terminal multipropósito <i>versus</i> terminal especializada.	666
4.5.2	Modelización en terminales multipropósito y de carga general.	670
4.6	Conclusiones y futuras líneas de investigación.	682
	Bibliografía.	687

Capítulo 5.....	737
Conclusiones, contribuciones de la tesis doctoral y futuras líneas de investigación	737
5.1 Conclusiones.	738
5.1.1 Conclusiones en cuanto al uso de modelos y simulación en entornos portuarios.	744
5.1.2 Conclusiones en cuanto a entornos de simulación pura en puertos y terminales (paradigmas de simulación: DES, ABS y SD); emulación y modelos físicos.	746
5.1.3 Conclusiones en cuanto a modelos de simulación en diferentes clases de terminales dedicadas y terminales multipropósito.	749
5.2 Contribuciones de la tesis doctoral.	751
5.3 Futuras líneas de investigación	756

Anejo 1.....	761
Modelos Analíticos basados en Teoría de Colas	761
1. Introducción.....	762
2. Principios básicos y metodológicos de la teoría de colas.....	763
3. Definiciones y relaciones estadísticas básicas.	772
4. Resolución analítica de diferentes sistemas.....	784
4.1. Soluciones Exactas: Sistemas M/M/n; G/M/1 y M/G/1	785
4.1.1. Sistema M/M/n.....	785
4.1.2. Sistemas M/G(z)/1 y G(y)/M/1.	802
4.1.3. Sistema M/Ek/1.....	803
4.1.4. Sistema M/D/1.	807
4.1.5. Sistemas Ek/M/1.	812
4.1.6. Sistema D/M/1.	817
4.1.7. Comparación sistemas D/M/1, M/D/1 y M/M/1. Efecto de la regularidad en la espera relativa.....	822
4.2. Soluciones aproximadas.	827
4.2.1. Introducción: soluciones exactas versus soluciones aproximadas. ..	827
4.2.2. Sistemas M/D/N: Tiempos de servicio constante y llegadas markovianas.	828
4.2.3. Sistemas D/ Ek/N y D/M/N: Tiempos de llegada constante y leyes de servicio Ek o Determinista (constante).	839
4.2.4. Sistemas M/Ek/N: Distribución tiempos de servicio Erlang (Ek) y llegadas markovianas.	840

4.2.5.	Sistemas E2/E2/N y E3/E3/N: Soluciones con ley de llegada y servicio Erlang 2 y 3 y su comparación con sistemas con misma ley de servicio y ley de llegadas aleatorias. Influencia de la regularidad de servicio y llegadas.....	850
5.	Modelos de planificación portuaria basados en la congestión:	856
5.1.	Conceptos de tráfico de saturación, tráfico de congestión y tráfico límite.	856
5.2.	Ejemplo de aplicación práctica de cálculo de tráficos de saturación, congestión y límite.	870
5.3.	Enfoque al tráfico de congestión conforme las Recomendaciones de Obras Marítimas (EPPE; 2016). Método Simplificado.	875
6.	Comparación entre resultados teóricos obtenidos con QT y observaciones reales.	877
7.	Método de la capacidad Económica. Sistema buque-puerto.	881
7.1.	Bases metodológicos de los métodos de capacidad económica.	881
7.2.	Tráfico de Equilibrio.	884
7.2.1.	Tráfico de equilibrio para 1 atraque.	884
7.2.2.	Tráfico de Equilibrio para varios atraques. Curva de planificación óptima de atraques	886
7.3.	Métodos de Capacidad Económica.	895
7.3.1.	Métodos de capacidad económica de primera generación. Índices de relación en función de costes de buque y muelle.....	895
7.3.2.	Métodos de capacidad económica de segunda generación. Índices de relación en función de costes de buque, muelle y otras componentes de la operación portuaria.	898
8.	Otros modelos basados en QT aplicados en aplicaciones portuarias.	903
8.1.	Modelos de redes de colas (Queuing Network Models o QNM's).....	907
8.2.	Procesos de decisión markovianos	914
8.3.	Modelos cíclicos en QT.....	915

8.4. Sistemas con llegadas de buques / mercancía en grupos. Sistemas $M(n)/M/N$ y $M(n)/G/N$	916
Bibliografía	920
Bibliografía Completa Tesis Doctoral.....	935

Índice de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1. Referencias bibliográficas en el ámbito de la simulación.....	30
Tabla 2. Los lenguajes de programación basados en OOP.....	48
Tabla 3. Evolución del programa Taylor ®.....	59
Tabla 4. Paquetes comerciales de simulación.....	63
Tabla 5. Uso de paquetes de simulación en diferentes campos de actividad.....	67

Capítulo 2

Tabla 6.	Esquema modular de PORTMODEL (UNCTAD, 1969).....	127
Tabla 7.	Generación de demanda de atraque en el modelo MIT.	134
Tabla 8.	Referencias bibliográficas en relación al enfoque especializado o de resolución aislada de problemas de planificación portuaria usando modelos simulación.....	167
Tabla 9.	Algoritmos de resolución de problemas utilizados en técnicas de simulación en ambientes portuarios.....	193
Tabla 10.	Aplicaciones prácticas de simulación portuaria. Autores y paquetes de simulación utilizados.....	200

Capítulo 3

Tabla 11.	Definición de agentes, roles y objetivos de los mismos en el modelo SIMPORT.	318
Tabla 12.	Resumen de resultados obtenidos mediante simulación por Henesey (2006a). ...	322
Tabla 13.	Resultados de distintos escenarios con combinación de política de asignación de atraque, concentración de llegadas de barcos (“even”/“peak”) y grados de utilización del puerto ((“high”/“low”).	327
Tabla 14.	Paquetes de simulación ABS y sistemas multiagente.....	343
Tabla 15.	Variables de relación causal utilizadas por diferentes autores.....	404
Tabla 16.	Variables de relación causal utilizadas por diferentes autores.....	407
Tabla 17.	Clasificación de modelos SD en ambientes portuarios atendiendo a propiedades de integración, horizonte temporal y dificultades intrínsecas del modelo.....	410
Tabla 18.	Software disponible para realización de modelos SD.	412
Tabla 19.	Software más extendidos para la realización de simulaciones SD entornos portuarios.	415

Capítulo 4

Tabla 20. Desglose de movimiento de graneles sólidos y total carga (MTons). Periodo 2006-2015.....	507
Tabla 21. Evolución del volumen de mercancía (Mtons cargadas) por diferentes grupos en años seleccionados del periodo 1970-2014.	509
Tabla 22. Flota de bulk carriers por tipo de barco.....	511
Tabla 23. Cuantificación de la ocurrencia y severidad de las causas de fallos en la terminal de graneles BIK de Irán.	557
Tabla 24. Tablas de normalización de ocurrencia, severidad y probabilidad de detección prematura de fallos en una terminal de graneles sólidos.....	559
Tabla 25. Funciones de distribución de llegada de buques en distintas terminales conforme diferentes autores.	563
Tabla 26. Ajustes de distribución de llegada de buques.....	563
Tabla 27. Funciones de distribución de tiempos de servicio de buques en diferentes terminales según diferentes autores.	564
Tabla 28. Ajustes de distribución de tiempo de servicios de buques.	564
Tabla 29. Estudios de modelización en terminales de graneles sólidos.	570
Tabla 30. Referencias bibliográficas en relación al tráfico y terminales de GNL.....	599
Tabla 31. Comparación de resultados del modelo de Faghri y Wahed (2002) para evaluar una terminal multipropósito usando técnicas de escenarios “what if”.....	675

Anejo 1

Tabla 32. Analisis de la literatura en relación a la QT. Soluciones propuestas a diferentes sistemas.	772
Tabla 33. Funciones de distribución aplicables a diferentes tipos de terminales de contenedores.	779
Tabla 34. Distribuciones de intervalo entre llegadas y tiempos de servicio en terminales de contenedores (públicas y dedicadas) del puerto Valencia (España).	780
Tabla 35. Funciones de distribución propuesta por diferentes autores.	782
Tabla 36. Ecuaciones relativas a sistemas markovianos M/M/N.	786
Tabla 37. Ecuaciones relativas a sistemas M/M/1 y M/M/2.	787
Tabla 38. Probabilidad (P_0) de muelle vacío en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.	788
Tabla 39. Probabilidad (P_q) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.	789
Tabla 40. Espera relativa ($\eta = W_q/W_s$) de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.	790
Tabla 41. Número de barcos en cola (L_q) (Sistema M/M/N).	791
Tabla 42. N° barcos en servicio (L_s) (Sistema M/M/N).	791
Tabla 43. Número de barcos en el sistema (L) (Sistema M/M/N).	792
Tabla 44. Soluciones a los sistemas de un atraque y una de las leyes markovianas (siendo la otra cualesquiera).	802
Tabla 45. Esperanza relativa en sistemas M/Ek/1.	804
Tabla 46. Número medio de barcos en cola (L_q) en sistemas M/Ek/1.	807
Tabla 47. Variables representativas en un sistema M/D/1 (llegadas aleatorias, servicio constante y 1 atraque).	809

Tabla 48.	Probabilidad de muelle vacío (P_0). Sistemas $E_k/M/1$	813
Tabla 49.	Espera relativa (η). Sistemas $E_k/M/1$	814
Tabla 50.	Variables representativas en un sistema $D/M/1$ (llegadas constantes, servicio aleatorio y 1 atraque).....	818
Tabla 51.	Comparación de espera relativa (η) y longitud media de la cola (L_q) en sistemas de un único atraque ($D/M/1$, $M/D/1$ y $M/M/1$).	823
Tabla 52.	Esperas relativas en sistemas ($M/D/N$).	829
Tabla 53.	Esperas relativas sistemas $M/D/N$ y $M/M/N$ para $N=2, 5$ y 10 atraques.	832
Tabla 54.	Relación entre esperas relativas sistemas $M/D/N$ y $M/M/N$ ($\eta(M/D/N)/\eta(M/M/N)$).	836
Tabla 55.	Espera Relativa Sistema $M/E2/N$	842
Tabla 56.	Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E3/N$	845
Tabla 57.	Espera Relativa Sistema $E2/E2/N$	851
Tabla 58.	Tasas de congestión para sistemas con ley de llegadas exponencial (M) y cualquier ley de servicio $G(\gamma)$ y número de atraques (sistema $M/G/N$).....	861
Tabla 59.	Tasas de congestión para cualquier ley de entrada $G(z)$ y de servicio $G(\gamma)$. Unico Atraque. Sistema $G(\gamma)/G(Z)/1$	863
Tabla 60.	Grado de Ocupación Máximo recomendado.....	866
Tabla 61.	Grado de Ocupación Máximo recomendado.....	867
Tabla 62.	Factor de Ocupación conectado con el Factor de Congestión.....	868
Tabla 63.	Capacidad Económica con Leyes de llegada Exponencial (Sistemas $M/G(z)/N$)...	892
Tabla 64.	Capacidad Económica sistemas de un atraque (Sistemas $G(\gamma)/G(z)/1$). (1985).....	894
Tabla 65.	Comparación de Funciones de Coste para determinar el número de atraques según diversos autores.	898
Tabla 66.	Parámetros de cálculo (índice de evaluación del coste y parámetros de infraestructura) para distintos niveles de servicio.....	901

Tabla 67. Comparación de métodos de estimación del número inicial de atraques según tres métodos.	902
Tabla 68. Evolución de modelos de planificación de Sistemas Portuarios.	904
Tabla 69. Distintas aproximaciones basadas en QT en ambiente portuario.....	904
Tabla 70. Productividad terminal de madera Puerto de Klang (Malasia). Simulación mediante QNM.	910

Índice de Ilustraciones

Capítulo 1

Ilustración 1. Orígenes, historia y evolución de las técnicas de simulación.	7
Ilustración 2. Diagrama Cíclico de Actividades en la cadena del acero según K.D.Tocher.	10
Ilustración 3. Modelo de dinámica de sistemas.....	12
Ilustración 4. Detalle del modelo detrás de World Dynamics. Diagrama de WORLD2.....	14
Ilustración 5. Genealogía de GPSS.	19
Ilustración 6. Clasificación del software de simulación.....	34
Ilustración 7. Mapa de paradigmas en simulación conforme el nivel de Abstracción.....	37
Ilustración 8. Aplicaciones prácticas de diferentes paradigmas de simulación conforme el nivel de Abstracción requerido.	40
Ilustración 9. Historia de simulación.	68

Capítulo 2

Ilustración 10. Proceso secuencial resumido en el desarrollo portuario.....	125
Ilustración 11. Secuencia de decisión detallada en el modelo PORTMODEL.	125
Ilustración 12. Secuencia de ejecución de PORTMODEL (UNCTAD, 1969).	128
Ilustración 13. Lógica del modelo de simulación portuaria del MIT.	133
Ilustración 14. Definición de buques y construcción de la tabla de demanda de atraque.....	136
Ilustración 15. Lógica del programa de operación.	137
Ilustración 16. Diagrama de flujo de asignación de atraque.....	138
Ilustración 17. Rutina de operación.....	139
Ilustración 18. Rutina de asignación de atraque.	140
Ilustración 19. Núcleo de decisión en el módulo de simulación.	141
Ilustración 20. Flujograma de operaciones en el puerto de embarque. Modelo PORTSIM 4.3.	143
Ilustración 21. Flujograma de operaciones en el puerto de desembarque. Modelo CPORTS 1.4.	144
Ilustración 22. Flujograma de operaciones. Modelo PORTSIM 5.	145
Ilustración 23. Descripción general de modelo CRAFT:	148
Ilustración 24. Programa de diseño de infraestructuras portuarias según CRAFT.....	149
Ilustración 25. Ejemplo de interface gráfica para construcción del modelo en FLEXSIM TC ®.	152
Ilustración 26. Ejemplo de interface gráfica para animación de un modelo FLEXSIM TC ®.	152
Ilustración 27. Ejemplo de interface gráfica para introducción de datos en FLEXSIM TC ®.	152

Ilustración 28. Ejemplo de salida de estadísticas mediante el modelo FLEXSIM TC ®.	152
Ilustración 29. Simulación de una terminal de graneles líquidos sólidos con descarga de cintas mediante el software SIMIO ®.	155
Ilustración 30. Simulación de una terminal contenedores mediante el software SIMIO ®.....	155
Ilustración 31. Simulación 2D y 3D de una terminal de contenedores con el software comercial ARENA®.	157
Ilustración 32. Principales módulos de CHESSCON.	159
Ilustración 33. Arquitectura del Sistema Modular para modelo de simulación portuario.	162
Ilustración 34. Estructura jerárquica en la resolución combinada de problemas de simulación portuaria.	179
Ilustración 35. Esquema matricial de planificación portuaria aplicada a terminales de contenedores.	182
Ilustración 36. Niveles de Planificación en una terminal de contenedores.	183
Ilustración 37. Niveles de Planificación en una terminal de contenedores.	183
Ilustración 38. Comparación de resultados entre modelo de simulación y teoría de colas (procedimiento analítico).	204
Ilustración 39. Coste de buque versus intensidad de tráfico. Aplicación práctica de funciones de coste.	205
Ilustración 40. Flujogramas de llegada y salida de buques.	206
Ilustración 41. Flujograma de operaciones terrestres en una terminal de contenedores.	207
Ilustración 42. Comparación de resultados obtenidos por procedimientos analíticos clásicos de teoría de colas y ejercicio de simulación.	208

Capítulo 3

Ilustración 43.	Elementos de la cadena de suministro en el modelo de Swaminathan et al. (1998).....	308
Ilustración 44.	Pirámide jerárquica de agentes que actúan en una terminal de contenedores.	310
Ilustración 45.	Subsistemas dentro de una terminal de contenedores.	315
Ilustración 46.	Esquemas de interacción entre agentes y traspaso de costes entre agentes. .	316
Ilustración 47.	Arquitectura del modelo SIMPORT.	319
Ilustración 48.	Diagrama de operaciones de SIMPORT.	320
Ilustración 49.	Resultados de los escenarios simulados.	323
Ilustración 50.	Arquitectura del modelo MAS.	325
Ilustración 51.	Modelización de una terminal de contenedores utilizando la arquitectura de Harward.	329
Ilustración 52.	Arquitectura del sistema ContMAS.	331
Ilustración 53.	Diagrama de flujo el sistema combinado CLA's – ABS	333
Ilustración 54.	Estructura en tres capas para integrar GIS y MAS utilizando MicroCity©..	335
Ilustración 55.	Diagrama general de simulación.	336
Ilustración 56.	Ejemplo de integración GIS – Simulación con la herramienta MicroCity©.	337
Ilustración 57.	Estructura causal del modelo MAS para resolver el problema de programación de ataques en una terminal atendida por barcazas en el puerto de Rotterdam (Holanda).	339
Ilustración 58.	Modelo elemental de flujo de mercancías e información.	349
Ilustración 59.	Modelo estructural para simulación de una terminal de contenedores mediante SD.	350

Ilustración 60.	Sistema completo de una terminal de contenedores modelado en POWERSIM.	350
Ilustración 61.	Diagrama de flujo de la operación de atraque.....	351
Ilustración 62.	Diagrama completo de simulación.....	352
Ilustración 63.	Diagrama casual (“casual loop”) de los trabajos de una terminal y su fiabilidad.	353
Ilustración 64.	Diagrama de causalidad (“causal loop”) entre equipamiento e infraestructuras de una terminal y su fiabilidad.....	354
Ilustración 65.	Variación en el tiempo de despacho (expresado en grado de cumplimiento de los objetivos impuestos).....	354
Ilustración 66.	Variación en el tiempo de la fiabilidad de una terminal de contenedores.....	354
Ilustración 67.	Volumen movido por la terminal	354
Ilustración 68.	Diagrama del módulo de amarre y descarga.....	356
Ilustración 69.	Diagrama del módulo de despacho de salida de contenedores de importación (carga de camiones y trenes).....	357
Ilustración 70.	Tiempo de barco en puerto en el subsistema de tiempo (“TS”) en modelización dinámica.....	359
Ilustración 71.	Tiempo de mercancía en puerto en el subsistema de tiempo (“TS”) en la modelización dinámica.	359
Ilustración 72.	Subsistema de calidad y seguridad (“QS”) en la modelización dinámica.....	360
Ilustración 73.	Subsistema de beneficios (“PS”) en la modelización dinámica.....	361
Ilustración 74.	Subsistemas y sistemas en puerto.	363
Ilustración 75.	Modelo conceptual SD para el ciclo de importación a través de ferrocarril.	364
Ilustración 76.	Modelo en dos fases: optimización y SD.....	366
Ilustración 77.	Diagrama casual loop propuesto para un modelo SD portuario.	366
Ilustración 78.	Diagrama de flujos y stocks en modelo SD.	366

Ilustración 79.	Variación media de variables de control.....	367
Ilustración 80.	Flujo físico de movimiento de barcos.....	368
Ilustración 81.	Cadena de eventos en la secuencia de movimiento de barcos.	368
Ilustración 82.	Rutina de gestión de atraques.....	369
Ilustración 83.	Rutina de gestión de tiempos de maniobra.	369
Ilustración 84.	Diagrama de relación (“causal loop”) entre variables económicas y capacidad de manipulación de tráfico general (a) y simplificado (b) de un país.....	371
Ilustración 85.	Modelo de capacidad portuaria basado en el número, tipo y horas de trabajo de las grúas de sus terminales.....	372
Ilustración 86.	Diagrama de detalle del modelo de capacidad portuaria propuesto.....	372
Ilustración 87.	Capacidad de terminales de contenedores de Suecia.....	373
Ilustración 88.	Exceso de capacidad en puertos de contenedores de Suecia.....	373
Ilustración 89.	Capacidad de terminales de contenedores de China.	373
Ilustración 90.	Exceso de capacidad en terminales de contenedores de China.....	373
Ilustración 91.	Relación entre variables macroeconómicas y económicos del puerto de Palermo (Italia).....	374
Ilustración 92.	Modelo SD propuesto para el puerto de Palermo (Italia).	375
Ilustración 93.	Diagrama causal para la determinación del tráfico de contenedores.	377
Ilustración 94.	Diagrama de flujos y stocks para el volumen de contenedores.....	377
Ilustración 95.	Diagrama de flujos y stocks para el factor de comercio internacional.....	377
Ilustración 96.	Método de selección de datos para alimentación de un modelo SD en puertos.	377
Ilustración 97.	Relación entre el tráfico de contenedores y la economía de Taiwan.	378
Ilustración 98.	Relación entre el tráfico de contenedores y la economía de Corea del Sur. .	378
Ilustración 99.	Metodología “ISA” de valoración integrada de sostenibilidad.....	384

Ilustración 100.	Diagrama causal de aspectos relacionados con investigación y desarrollo y dispersión de actividades en relación a asuntos relativos al “océano”.....	385
Ilustración 101.	Diagrama causal en relación a aspectos de planificación espacial de espacios costeros.	385
Ilustración 102.	Diagrama causal en relación a los problemas relacionados con la sobreexplotación de recursos costeros.	386
Ilustración 103.	Diagrama causal de aspectos relacionados con los impactos en espacios costeros.	386
Ilustración 104.	Diagrama causal de aspectos relacionados con la gobernanza y ordenación de asuntos marítimos.	387
Ilustración 105.	Diagrama de disponibilidad de instalaciones intermodales en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.	389
Ilustración 106.	Diagrama relativo al Sistema Portuario en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.	390
Ilustración 107.	Diagrama relativo al Modelo de Costes en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.	390
Ilustración 108.	Diagrama relativo a Flujo de Mercancías en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.	391
Ilustración 109.	Diagrama relativo a la evaluación de Impactos Ambientales en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.	391
Ilustración 110.	Diagrama relativo a Impacto Económico Regional en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.	391
Ilustración 111.	Diagrama relativo a Sistemas de Información en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.	392
Ilustración 112.	Modelo SD para ilustrar las relaciones entre un puerto y su ciudad.	396
Ilustración 113.	Diagrama causal y definición de bucles (causal loop) en un modelo SD.	398
Ilustración 114.	Sistema Dinámico puerto – ciudad según Luan et al. (2010).	399
Ilustración 115.	Contribución absoluta (directa e indirecta) del puerto en la economía de su ciudad.	399

Ilustración 116.	Simulación de la contribución porcentual del puerto en la economía de su ciudad.....	399
Ilustración 117.	Interrelación de la influencia de puerto en la economía local. Diagrama explicativo bajo SD.....	402
Ilustración 118.	Ejemplo de creación de diagramas con el software VenSim ®.	417
Ilustración 119.	Clasificación de los modelos de simulación en función de su composición y dependencia con elementos reales del sistema.....	421
Ilustración 120.	Imágenes del modelo de simulación portuaria construido mediante TIMESQUARE © de la empresa TAB.....	423
Ilustración 121.	Imágenes del modelo de simulación portuaria construido mediante TRAFALQUARE © de la empresa TAB.	423
Ilustración 122.	Imágenes del modelo de simulación portuaria construido mediante TRAFALQUARE –BULK © de la empresa TBA.	424
Ilustración 123.	Plataforma de emulación de una terminal de contenedores CONTROLS de TBA.	425
Ilustración 124.	Vista de un modelo de una terminal de contenedores construido Limen.....	426
Ilustración 125.	Canal de experimentación del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid (España).....	428
Ilustración 126.	Ensayo 2D de comprobación de la estabilidad estructural del manto de dique del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España).....	428
Ilustración 127.	Modelo Físico del Morro del Dique del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España). Alternativa sección en talud.	429
Ilustración 128.	Modelo Físico para ensayo del tronco del Dique del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España). Alternativa sección en talud y morro vertical.	429
Ilustración 129.	Ensayo 3D de comportamiento estructural del dique de abrigo del puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España).	429
Ilustración 130.	Modelo Físico 3D del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España) para verificación de las condiciones de agitación.....	431

Ilustración 131. Modelo Físico 3D del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España) para verificación de las condiciones de buque atracado.	432
Ilustración 132. Prototipo de buque atracado en el modelo del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España) para verificación de los movimientos del mismo.....	432
Ilustración 133. Laboratorio de AGV para el estudio de una terminal automatizada usando modelización física.	434

Capítulo 4

Ilustración 134.	Toneladas cargadas de graneles sólidos. Periodo 2006-2015.	508
Ilustración 135.	Toneladas cargadas de graneles sólidos. División entre mayor y minor bulks. Periodo 2006-2015.....	508
Ilustración 136.	Toneladas cargadas de mineral de hierro. Periodo 2006-2015.	508
Ilustración 137.	Toneladas cargadas de carbón Periodo 2006-2015.....	508
Ilustración 138.	Toneladas cargadas de grano. Periodo 2006-2015.....	508
Ilustración 139.	Toneladas cargadas de bauxita / alúmina. Periodo 2006-2015.	508
Ilustración 140.	Toneladas cargadas de los cinco principales graneles sólidos 1970-2014....	510
Ilustración 141.	Porcentaje de toneladas de los cinco principales graneles sólidos respecto el total de carga.	510
Ilustración 142.	Flota de bulk carriers. Edad media por tipo de barco y ordenes de construcción periodo 2015-2018.	512
Ilustración 143.	Abaco de dimensionamiento de una terminal de graneles sólidos 1: Dimensionamiento de atraque y descargadores.	513
Ilustración 144.	Abaco de dimensionamiento de una terminal de graneles sólidos 2: Coste de barcos.	513
Ilustración 145.	Abaco de dimensionamiento de una terminal de graneles sólidos 3: Zona de Almacenamiento	513
Ilustración 146.	Gráfico de dimensionamiento de la zona de almacenamiento en función de la capacidad anual requerida y tamaño medio de cargamento.....	513
Ilustración 147.	Configuración típica de una terminal de exportación de granel sólido.....	515
Ilustración 148.	Ejemplo de cargador móvil (travelling ship-loader) alimentado desde cinta.	515
Ilustración 149.	Equipo de carga neumático.	516

Ilustración 150.	Ejemplo de descargador móvil de cuchara (travelling overhead trolley unloader grabbing crane).	516
Ilustración 151.	Grúa de cuchara convencional.	516
Ilustración 152.	Stacker / reclaimers.	516
Ilustración 153.	Ejemplo de terminal de exportación de mineral de hierro en Nouadhibou (Mauritania).	517
Ilustración 154.	Ejemplos de stacker-reclaimer (fotografías superiores), cargadores/descargadores de muelle (fotografías intermedias) y sistemas de cintas (fotografía inferior) en terminales de graneles sólidos.	518
Ilustración 155.	Resultados del ejercicio simulación y evaluación del número de atraques necesarios en la ampliación portuaria.	520
Ilustración 156.	ACD (“Activity cycle diagram”) para un modelo portuario.	521
Ilustración 157.	Esquema operativo de una terminal de graneles sólidos.	525
Ilustración 158.	Representación del modelo de una terminal de carbón programada en PORTMODEL.	526
Ilustración 159.	Representación del modelo de una terminal de mineral de hierro programada en PORTMODEL.	526
Ilustración 160.	Secuencia de operación portuaria en una terminal.	527
Ilustración 161.	Configuración tipo de una terminal de exportación de granel sólido alimentada por ferrocarril y operada mediante cintas, stacker-reclaimer y grúas de carga a buque.....	529
Ilustración 162.	Modelización de una terminal de exportación de granel sólido alimentada por tres descargadores de ferrocarril (“train unloaders”), diseñada con 18 convoys de cintas transportadoras (“conveyors”) y 6 stacker-reclaimer operando en la zona de almacenamiento (“stock yard”), que alimentan 3 grúas de carga de bulkcarriers.	529
Ilustración 163.	Representación del modelo de una terminal graneles sólidos de tres atraques programada en PORTMODEL.	530

Ilustración 164.	Ejemplo de librería para puertos de Portmodel y modelo generado.	530
Ilustración 165.	Esquema general de una terminal de graneles y relación entre las distintas componentes.	531
Ilustración 166.	Esquema conceptual de funcionamiento de una terminal de carbón para simulación	533
Ilustración 167.	Relación entre las variables que afectan al problema de dimensionamiento de un sistema de barcasas – transbordo.	535
Ilustración 168.	Modelo de transbordo de carbón (estación transferencia off-shore) y transporte con barcasas hasta puerto fluvial mediante Redes de Petri: Ida en carga.	536
Ilustración 169.	Representación del modelo de transbordo de carbón (estación transferencia off-shore) y transporte con barcasas hasta puerto fluvial mediante Redes de Petri: Vuelta en lastre.	536
Ilustración 170.	Lógica del proceso de importación en una terminal de graneles sólidos.	537
Ilustración 171.	Lógica del proceso de exportación en una terminal de graneles sólidos.	537
Ilustración 172.	Representación gráfica del método “Multiple-stage decision”.	538
Ilustración 173.	Representación gráfica de la tecnología Web-server.	539
Ilustración 174.	Descomposición jerárquica de sistemas y subsistemas y fases de servicio en la operación de una terminal de graneles sólidos.	541
Ilustración 175.	Esquema de cooperación parcial de grúas de descarga en una terminal de graneles.	543
Ilustración 176.	Diagrama de transición de grúas con diferentes estrategias de colaboración.	544
Ilustración 177.	Presentación de resultados de modelización de una terminal fluvial de graneles.	545
Ilustración 178.	Factor de almacenamiento ($Tn/m^2/año$) en terminales de carbón y mineral de hierro.	547
Ilustración 179.	Factor de abastecimiento en función del tipo de material (carbón o mineral de hierro) y tiempo medio de permanencia en almacenamiento.	547

Ilustración 180.	Factor de abastecimiento en función del tiempo entre llegada de buques y tiempo medio de permanencia en almacenamiento.	547
Ilustración 181.	Factor de abastecimiento en función del tamaño del buque y tiempo medio de permanencia en almacenamiento.	547
Ilustración 182.	Arquitectura del DSS (Dynamic Planner) para la gestión de terminales de graneles sólidos y selección de enrutamientos de mercancía en el interior de la terminal.	549
Ilustración 183.	Diagrama de flujo en los procesos de cargado de vehículos en una terminal de graneles.	550
Ilustración 184.	Modelo multi-capa en el proceso de cargado de vehículos en una terminal de graneles.	551
Ilustración 185.	Esquema conceptual de descarga de graneles.	551
Ilustración 186.	Grafo de eventos de una terminal de exportación de grano.	553
Ilustración 187.	Diagrama del ciclo de actividades de una terminal de exportación de grano.	554
Ilustración 188.	Modelo simplificado de una terminal de exportación de grano.	554
Ilustración 189.	Diagrama de Causa – Efecto en la terminal de graneles BIK de Irán.	556
Ilustración 190.	Ejemplo de análisis de Pareto para analizar las causas de los retrasos en las operaciones en la terminal de graneles BIK de Irán.	558
Ilustración 191.	Análisis RPN (Risk Priority Numbers) en la Dry Bulk Imam Khomeini Terminal (Irán).	560
Ilustración 192.	Relación entre los ratios de descarga Q_s (Kton/hora) y el tamaño de los barcos (shipload) (Kton).	565
Ilustración 193.	Comparación entre resultados de modelo y teoría de colas aplicando un sistema M/M/4 en una terminal de graneles sólidos.	566
Ilustración 194.	Determinación de la capacidad de descarga.	567
Ilustración 195.	Eficiencia de las grúas en la descarga (A) y distribución de tipo de buques (B) basado en datos históricos de una terminal Fuente: van Vianen (2014).	567

Ilustración 196.	Representación esquemática de una terminal de importación de graneles operada mediante cintas.....	568
Ilustración 197.	Representación simplificada de un modelo de dos colas M/D/1 en las pilas de una terminal de granel sólido.	569
Ilustración 198.	Comparación entre los resultados de simulación y analíticos (cola M/D1) obtenido en el modelo de van Vianen (2015) para dimensionamiento de un sistema de cintas de una terminal de granel sólido). En la gráfica W_t es el tiempo medio de espera y ρ es el coeficiente de utilización del stacker-reclaimer.	569
Ilustración 199.	Evolución histórica de la cobertura científica al campo de modelización de terminales de graneles sólidos. Número de artículos publicados por año (1961-2015).	576
Ilustración 200.	Evolución histórica de la cobertura científica al campo de modelización de terminales de graneles sólidos. Número de artículos publicados por década.	576
Ilustración 201.	Evolución histórica de la cobertura científica al campo de modelización de terminales de graneles sólidos. Número de artículos publicados por tipo de terminal.	576
Ilustración 202.	Operación de transbordo de graneles líquidos (“lightering”).	583
Ilustración 203.	Ejemplo de Diagrama Gantt utilizado para representar los datos del modelo de transbordo de crudo de petróleo.	584
Ilustración 204.	Esquema de funcionamiento de una refinería. Fuente: Mendez et al. (2004).	585
Ilustración 205.	Reservas y producción de gas natural en el mundo.	590
Ilustración 206.	Ladena logística del gas natural y el GNL.	591
Ilustración 207.	Volumen de tráfico de GNL en contratos spot (non Long-Term trade) y participación del GNL en el tráfico total de gas natural: 1995-2015.	593
Ilustración 208.	Volumen de tráfico de GNL 2000-2014.	593
Ilustración 209.	Capacidad de Regasificación y número de países exportadores e importadores de GNL 1990-2015.	593

Ilustración 210.	Número de buques metaneros en operación por año de entrega de los mismos y capacidad acumulada de transporte (m3).....	594
Ilustración 211.	Capacidad de licuefacción y grado de utilización 1990-2021.	595
Ilustración 212.	Capacidad de regasificación y su grado de utilización 1990-2021.	595
Ilustración 213.	Operaciones de re-exportación por países 2005-2015.	596
Ilustración 214.	Evolución comparada del precio del gas natural de referencia en Estados Unidos (Índice Henry Hub) y del GNL en Japón. Fuente: BP Statistical Review (2016), elaboración propia.....	597
Ilustración 215.	Evolución comparada de precio de gas natural en Estados Unidos (índice Henry Hub) y del precio de petróleo (precio medio CIF en países OECD). Fuente: BP Statistical Review (2016), elaboración propia.	597
Ilustración 216.	Representación gráfica de elementos básicos.	605
Ilustración 217.	Esquema de funcionamiento de la planta de Snøhvit según Dahl (2007).	607
Ilustración 218.	Costes incurridos y cambios en la producción producidos por el retraso de un barco en la planta de Snøhvit.	608
Ilustración 219.	Cadena de valor del gas.	610
Ilustración 220.	Diagrama explicativo (modelo “arc-flow”) de la secuencia de enrutamiento de buques.	611
Ilustración 221.	Ejemplo de resultados con el ship routing plan en un periodo de 192 días. .	616
Ilustración 222.	Subsistemas de una terminal Ro-Ro.	626
Ilustración 223.	Metodología propuesta para el estudio de termiales Ro-Ro.	627
Ilustración 224.	Segmentación del lay-out de la terminal Ro-Ro.	628
Ilustración 225.	Proceso de exportación de camiones (“trucks”) en una terminal Ro-Ro.	628
Ilustración 226.	Proceso de exportación de “trailers” en una terminal Ro-Ro.	629
Ilustración 227.	Proceso de importación de camiones en una terminal Ro-Ro.....	629
Ilustración 228.	Proceso de importación de trailers en una terminal Ro-Ro.....	630

Ilustración 229.	Proceso de llegada de buques en una terminal Ro-Ro	630
Ilustración 230.	Resultados sobre ratios de utilización de los elementos de exportación en una terminal Ro-Ro de Turquía	631
Ilustración 231.	Resultados sobre ratios de utilización de los elementos de importación en una terminal Ro-Ro de Turquía.	631
Ilustración 232.	Máximo número de vehículos en en una terminal Ro-Ro de Turquía.	632
Ilustración 233.	Sistema de llegada de vehículos a una terminal Ro-Ro.	634
Ilustración 234.	Sistema de espera de vehículos a la espera de las inspecciones de seguridad de una terminal Ro-Ro.....	634
Ilustración 235.	Sistema de chequeos de seguridad de una terminal Ro-Ro.....	635
Ilustración 236.	Sistema de embarque de vehículos en una terminal Ro-Ro.....	635
Ilustración 237.	Modelo de funcionamiento de una terminal Ro-Ro usando AnyLogyc 6.6.0 ©. Fuente: modelo de Kaceli (2016).....	637
Ilustración 238.	Modelo de funcionamiento de una terminal Ro-Ro usando Arena©	638
Ilustración 239.	Flujo de operaciones de exportación e importación en una terminal Ro-Ro.	639
Ilustración 240.	MAFI's para operación de Tráfico Ro-Ro.....	639
Ilustración 241.	Comparación de resultados en la simulación de una terminal Ro-Ro usando AnyLogic © y Arena ©	640
Ilustración 242.	Metodología para el estudio de una terminal Ro-Ro.	642
Ilustración 243.	Algoritmo del modelo de una terminal Ro-Ro.....	643
Ilustración 244.	Distribución estadística de los procesos de atraque, desatraque, descarga de cada vehículo y carga de cada vehículo en Pendik Ro-Ro Terminal (Estambul, Turquía).	644
Ilustración 245.	Capacidad de una terminal Ro-Ro en función del número de vehículos que llegan a la terminal.....	646
Ilustración 246.	Capacidad de una terminal Ro-Ro en función de la distancia entre las terminales que definen la línea.	646

Ilustración 247.	Capacidad de una terminal Ro-Ro en función de la capacidad de los barcos.	646
Ilustración 248.	Terminal de vehículos de Bremerhaven (Alemania).	648
Ilustración 249.	Volumen de tráfico de vehículos en el puerto de Bremerhaven (Bremen, Alemania).....	648
Ilustración 250.	Terminales autorizados para importación de vehículos en el año 2013.....	651
Ilustración 251.	Cambio de paradigma de distribución desde sistemas convencionales a estructuras de control autónomo.	652
Ilustración 252.	Esquema del proceso de decisión en una terminal de automóviles con funcionamiento autónomo.	653
Ilustración 253.	Asignación descentralizada de slots de depósito en una terminal autónoma de vehículos.	654
Ilustración 254.	Terminal E.H.Harms Auto-terminal de Hamburgo (Alemania).	655
Ilustración 255.	Comparación de resultados entre un sistema convencional “C” y otro autónomo “A” en el modelo de una terminal de automóviles.	655
Ilustración 256.	Modelo eM-Plant para gestión autónoma de una terminal de vehículos.	656
Ilustración 257.	Cadena logística tradicional en el sector del automóvil.....	658
Ilustración 258.	Nueva cadena logística en el sector del automóvil según Dias et al. (2010).	658
Ilustración 259.	Integración del modo marítimo en la cadena de logística del automóvil.....	659
Ilustración 260.	Esquema jerárquica de planificación en una terminal de vehículos.....	660
Ilustración 261.	Velocidad de desplazamiento horizontal de las personas según diversos investigadores.	662
Ilustración 262.	Ejemplo de punto de inspección de seguridad y procedimiento de inspección en una terminal de ferries.	664
Ilustración 263.	Variabilidad de tráfico y formas de manipulación en una terminal polivalente.	667
Ilustración 264.	Terminal Multipropósito Dradenau (Hamburgo, Alemania).	668

Ilustración 265.	Terminal Multipropósito de Wilhelmshaven (Wilhelmshaven, Holanda) ...	668
Ilustración 266.	Terminal Multipropósito del Puerto de Santa Marta (Colombia).	668
Ilustración 267.	Flujograma del proceso de importación en una terminal multipropósito. (figura 1 de 3).	672
Ilustración 268.	Flujograma del proceso de importación en una terminal multipropósito según el modelo de Faghri y Wahed (2002) (figura 2 de 3, continua de la ilustración 267).	673
Ilustración 269.	Flujograma del proceso de importación en una terminal multipropósito (figura 3 de 3, continua de la ilustración 268).	673
Ilustración 270.	Flujograma del proceso de exportación en una terminal multipropósito.	674
Ilustración 271.	Triangulación para resolución del problema de árbol de peso mínimo (minimal spanning tree o MST).....	677
Ilustración 272.	Artículo original de O. Borůvka: Příspěvek k řešení otázky ekonomické stavby elektrovodních sítí (Contribution to the solution of a problem of economical construction of electrical networks)“	678
Ilustración 273.	Variabilidad de cargas (tipología y formas de manipulación) en una terminal de mercancía general.	680
Ilustración 274.	Modulo de llegada de buques y asignación de atraque en el modelo de una terminal de mercancía general.	681
Ilustración 275.	Proceso de asignación de grúas a bodegas de buque en el modelo de una terminal de mercancía general.	681
Ilustración 276.	Proceso de carga y descarga de buques en el modelo de una terminal de mercancía general.	681
Ilustración 277.	Proceso de movimiento de grúas en el modelo de una terminal de mercancía general.....	681
Ilustración 278.	Flujograma secuencial lógico para simulación de la entrada de mercancía en una terminal multipropósito	682

Anejo 1

Ilustración 279.	Funciones de distribución y densidad Erlang (E_k) con $\lambda=2$	765
Ilustración 280.	Función de distribución Erlang de parámetro de forma 2 (E_2) y variaciones de λ	766
Ilustración 281.	Comparación entre funciones M (E_1), E_2 , E_3 y D (E_∞) para un tiempo medio de servicio de 5 días.	768
Ilustración 282.	Relación entre el tamaño del buque y los ratios de carga.	777
Ilustración 283.	Variación de los ritmos de descarga en un buque de graneles sólidos.....	781
Ilustración 284.	Probabilidad (P_0) de que un muelle este vacío en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala decimal).....	793
Ilustración 285.	Probabilidad (P_0) de que un muelle este vacío en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala logarítmica).	793
Ilustración 286.	Probabilidad (P_q) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala decimal).....	794
Ilustración 287.	Probabilidad (P_q) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala logarítmica).	794
Ilustración 288.	Espera relativa en un sistema M/M/n (escala decimal).	795
Ilustración 289.	Espera relativa en un sistema M/M/n (escala logarítmica).	795
Ilustración 290.	Espera relativa ($\eta=W_q/W_s$) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.	796
Ilustración 291.	Influencia del número de atraques en las esperas relativas y tasas de ocupación en un sistema M/M/n.	797
Ilustración 292.	Número de barcos en cola (L_q) en un sistema M/M/n (entre rangos de ocupación 0.60 y 0.95).	798

Ilustración 293.	Número de barcos en cola (L_q) en un sistema M/M/n (entre rangos de ocupación 0.60 y 0.95).	799
Ilustración 294.	Número de barcos en servicio (L_s) en un sistema M/M/n	800
Ilustración 295.	Número de barcos en cola (L_q) en un sistema M/M/n (entre rangos de $\alpha = 0.60$ y 0.95).	801
Ilustración 296.	Número de barcos en sistema (L) en un sistema M/M/n (entre rangos de $\alpha = 0.60$ y 0.95).	801
Ilustración 297.	Espera relativa en sistemas M/Ek/1.	805
Ilustración 298.	Relación esperas relativas en un sistema M/Ek/1.	806
Ilustración 299.	Número medio de marcos en cola (L_q) en un sistema M/Ek/1.	806
Ilustración 300.	Número de barcos en servicio (L_s) en un sistema M/D/1.	809
Ilustración 301.	Espera relativa en un sistema M/D/1. (Rango $\eta = 0-25$) (escala decimal)....	809
Ilustración 302.	Espera relativa en un sistema M/D/1 (Rango $\eta = 0 -5$) (escala decimal).....	809
Ilustración 303.	Espera relativa en un sistema M/D/1. (Escala exponencial).	809
Ilustración 304.	Probabilidad de buque es espera (P_q) y muelle vacío (P_0) en un sistema M/D/1.	811
Ilustración 305.	Número de barcos en cola (N_q) y en sistema (N_s) en un sistema M/D/1 (escala decimal).	811
Ilustración 306.	Número de barcos en cola (N_q) y en sistema (N_s) en un sistema M/D/1 (escala exponencial).	812
Ilustración 307.	Espera relativa en un sistema Ek/M/1 (escala decimal) (Rango $\alpha = 0,1-0,9$).	815
Ilustración 308.	Espera relativa en un sistema Ek/M/1 (escala decimal) (Rango $\alpha = 0,5-0,85$).	815
Ilustración 309.	Espera relativa en un sistema Ek/M/1 (escala exponencial).	816
Ilustración 310.	Espera relativa en un sistema D/M/1(rango $\eta = 0 -50$) (escala decimal).....	819

Ilustración 311.	Espera relativa en un sistema D/M/1(rango $\eta = 0 -5$) (escala decimal).....	819
Ilustración 312.	Espera relativa en un sistema D/M/1(escala exponencial).....	820
Ilustración 313.	Número de barcos en servicio (Ls) en un sistema D/M/1.....	820
Ilustración 314.	Número de barcos en cola (Nq) y en sistema (Ns) en un sistema D/M/1 (escala decimal).	821
Ilustración 315.	Número de barcos en cola (Nq) en sistema (Ns) en un sistema D/M/1 (escala exponencial).....	821
Ilustración 316.	Comparación de espera relativa (η) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-10 buques).....	824
Ilustración 317.	Comparación de espera relativa (η) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-4 buques).....	824
Ilustración 318.	Comparación de espera relativa (η) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala logarítmica).	825
Ilustración 319.	Comparación entre las longitudes media de cola (Lq) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-10 buques)....	825
Ilustración 320.	Comparación entre las longitudes media de cola (Lq) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-4 buques).....	826
Ilustración 321.	Comparación entre las longitudes media de cola (Lq) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala logarítmica).	826
Ilustración 322.	Diferencias relativas en las tasas relativas en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1).	827
Ilustración 323.	Espera relativa en sistema M/D/N.	830
Ilustración 324.	Comparación relativas sistemas M/D/2 y M/M/2.	833
Ilustración 325.	Comparación relativas sistemas M/D/5 y M/M/5.	833
Ilustración 326.	Comparación relativas sistemas M/D/10 y M/M/10.	834
Ilustración 327.	Comparación de las esperas relativas con tiempos de servicio exponenciales y constantes (M/M/N versus M/D/N) para el caso de un sistema con uno (1) y cinco (5) atraques.....	834

Ilustración 328.	Relación entre esperas relativas sistemas M/D/N y M/M/N (η (M/D/N)/ η (M/D/N)).	836
Ilustración 329.	Comparación relativa de sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso de 1 ataque.	837
Ilustración 330.	Comparación relativa de sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso de 2 ataques.	838
Ilustración 331.	Comparación relativa de sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso de 5 ataques.	838
Ilustración 332.	Comparación relativa de sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso de 10 ataques.	839
Ilustración 333.	Esperas relativas en función del número de ataque para un sistema M/E2/N.	841
Ilustración 334.	Tasa de ocupación (abcisas) versus esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 1 ataque.	843
Ilustración 335.	Tasa de ocupación (abcisas) versus esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 2 ataques.	843
Ilustración 336.	Tasa de ocupación (abcisas) versus esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 5 ataques.	844
Ilustración 337.	Tasa de ocupación (abcisas) versus esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 10 ataques.	844
Ilustración 338.	Aproximación para sistemas M/E3/N (Escala decimal). Fuente: Agerschou (2004).	846
Ilustración 339.	Aproximación para sistemas M/E3/N (Escala logarítmica). Fuente: Agerschou (2004).	846
Ilustración 340.	Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas M/E3/N y su comparación con los sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 1 ataque.	847
Ilustración 341.	Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas M/E3/N y su comparación con los sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 2 ataques.	847

Ilustración 342.	Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E3/N$ y su comparación con los sistemas $M/M/N$, $M/E2/N$ y $M/D/N$. Caso 5 ataques.....	848
Ilustración 343.	Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E3/N$ y su comparación con los sistemas $M/M/N$, $M/E2/N$ y $M/D/N$. Caso 10 ataques.....	848
Ilustración 344.	Esperas relativas en función del número de ataques (Sistemas $E2/E2/n$)....	852
Ilustración 345.	Análisis comparados de los sistemas $M/M/N$, $M/E2/N$ y $D/E2/N$. Efecto de la regularidad. Caso 1 ataque.....	853
Ilustración 346.	Análisis comparados de los sistemas $M/M/N$, $M/E2/N$ y $D/E2/N$. Efecto de la regularidad. Caso 2 ataques.	853
Ilustración 347.	Análisis comparados de los sistemas $M/M/N$, $M/E2/N$ y $D/E2/N$. Efecto de la regularidad. Caso 5 ataques.	854
Ilustración 348.	Sistemas $E3/E3/N$ y su comparación con sistemas $M/E3/N$	855
Ilustración 349.	Definición de tráfico de congestión y tráfico de saturación.....	859
Ilustración 350.	Tráfico e congestión para sistemas con ley de llegadas exponencial (M) y cualquier ley de servicio $G(\gamma)$ y número de ataques (sistema $M/G/N$)......	862
Ilustración 351.	Tasas de congestión para cualquier ley de llegadas $G(z)$ y de servicio $G(\gamma)$. Único Ataque. Sistema $G(\gamma)/G(Z)/1$	864
Ilustración 352.	Máximo Grado de Ocupación recomendado.....	867
Ilustración 353.	Factor de ocupación límite.....	868
Ilustración 354.	Factor de Congestión.	868
Ilustración 355.	Comparación de recomendaciones de grado de ocupación para tráfico regulares González (2006) versus Tsinker (2004).	869
Ilustración 356.	Comparación de recomendaciones de grado de ocupación para tráfico tramp González (2006) versus Tsinker (2004).	869
Ilustración 357.	Cálculo gráfico de tráfico límite y curva de estancia en una terminal de graneles de un ataque.	873
Ilustración 358.	Cálculo gráfico de tráfico límite y curva de estancia en una terminal de terminal polivalente de un ataque.	873

Ilustración 359.	Tasa de Ocupación recomienda en función del número de atraques, espera relativa y tipo de sistema.....	876
Ilustración 360.	Comparación entre leyes teóricas y observaciones reales de tiempos en cola y grado de ocupación.	879
Ilustración 361.	Costes unitarios de puerto en función del volumen de tráfico.	882
Ilustración 362.	Costes unitarios de estancia de barco en puerto.....	884
Ilustración 363.	Costes totales del sistema puerto + buque. Definición del coste mínimo y tráfico de equilibrio.	885
Ilustración 364.	Coste Total Unitario en función del número de atraques.....	887
Ilustración 365.	Curva de planificación óptima de atraques.	888
Ilustración 366.	Tasa de ocupación óptima para cambio de 1 a 2 atraques en un sistema con ley de llegadas y servicio exponenciales en función de los costes fijos portuarios y del buque.....	891
Ilustración 367.	Capacidad Económica con Leyes de llegada Exponencial (Sistemas $M/G(z)/N$).	893
Ilustración 368.	Capacidad Económica sistemas de un atraque (Sistemas $G(\gamma)/G(z)/1$)	894
Ilustración 369.	Cálculo de la Capacidad Óptima de los muelles utilizando el índice de.....	900
Ilustración 370.	Diagrama de proceso o modelo de red QNM de una terminal de exportación de Madera.	909
Ilustración 371.	Modelo Red. Sistema QNM en una terminal marítima. Modelización propuesta por Legato y Mazza (2001) para la terminal de contenedores del puerto de Gioia Tauro (Italia).	913
Ilustración 372.	Curva de capacidad óptima de servidores en el caso de grupos de 2 clientes $M(2)/M/c$	918
Ilustración 373.	Curva de capacidad óptima de servidores en el caso de grupos de 6 clientes $(M(6)/M/c)$	919

Lista de Acrónimos

Lista de Acrónimos

A-BEES	<i>Adaptative Balance Explorative and Exploitative Search</i>
ABS	<i>Agent-Based Simulation.</i>
ABMS	<i>Agent-Based Modelling and Simulation.</i>
ACD	<i>Activity Diagram Cycle.</i>
ADP	<i>Annual Delivery Program.</i>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle.</i>
ALV	<i>Automated Lifting Vehicle.</i>
AMA	<i>Applied modelling Algorithms.</i>
AMFE	<i>Análisis Modal de Fallos y Efectos.</i>
AOS	<i>Animation Oriented System / Appication Oriented Simlation.</i>
ARIMA	<i>Auto-Regressive Integrated Moving Average.</i>
ARMA	<i>Auto-Regressive Moving Average.</i>
ASBYL	<i>Anchorage-ship-berth-yard link</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers.</i>
AS/RS	<i>Automated Storage and Retrieval Systems.</i>
ASU	<i>Assosiation of Simulation Users.</i>
ATVFLU	<i>Actual Time Vessel is Fully Loaded or Unloaded.</i>
AVAT	<i>Actual Vessel Arrival Time.</i>

AVaR	<i>Average Value at Risk</i>
BAP	<i>Berth Allocation Problem.</i>
BAMS	<i>Berth Allocation Management System.</i>
BBS	<i>Block Based Systems.</i>
BCLP	<i>Basic Combined Programming Language.</i>
BCSP	<i>Berth Closest to the Stack Policy.</i>
BOG	<i>Boil-off Gas.</i>
BSP	<i>Berth Scheduling Problem.</i>
CIP	<i>Constraint Programming Language.</i>
CLA	<i>Container Loading Algorithm.</i>
CNG	<i>Compressed Natural Gas.</i>
CPL	<i>Combined Programming Language.</i>
CSP	<i>Constraint Solving Problems.</i>
CTMS	<i>Container Terminal Management System.</i>
CVaR	<i>Conditional Value at Risk.</i>
DES	<i>Discrete Event Simulation.</i>
DMCP	<i>Distributed Model predictive Control Methodology.</i>
DOE	<i>Design of Experiments.</i>
DSL	<i>Domain Specific Language.</i>
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communication.</i>
DSE	<i>Domain-Specific Extensions.</i>
DSS	<i>Decision Support System.</i>

DWT	<i>Dead Weight Tons.</i>
ES	<i>Expected Shorfall.</i>
EIA	<i>Enviromental Impact Assesment.</i>
ETL	<i>Expected Tail Loss.</i>
ETVFLU	<i>Expected Time Vessel Fully Loaded / Unloaded.</i>
EVAT	<i>Expected Vessel Arrival Time.</i>
EVPI	<i>Expected Value of Perfect Information.</i>
FIFO	<i>First-in First-Out.</i>
FLNG	<i>Floating LNG</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis.</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>
FRP	<i>Functional Reactivce Programming.</i>
FRSU	<i>Floating, Regasification and Storage Units.</i>
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System.</i>
GASP	<i>General Activity Simulation Program.</i>
GESM	<i>General Electric Manufacturing Modelling.</i>
GIS	<i>Geographic Information System.</i>
GNL	<i>Gas Natural Licuado.</i>
GPL	<i>General Purpuse Lenguage</i>
GPS	<i>Global Positioning System.</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedures.</i>

GSTs	<i>Generic Simulation Tools.</i>
GT	<i>Grey Theory.</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HEF	<i>Highest Earning First.</i>
HSF	<i>High size first.</i>
HSS	<i>Hybrid Simulation System.</i>
IAV	<i>Intelligent Autonomous Vehicle.</i>
IDSS	<i>Intelligence Decision Support System</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
IRP	<i>Inventory & Routing Problem</i>
ISA	<i>Integrated Sustainability Assessment.</i>
ISPS	<i>International Ship and Port Facility Security</i>
JADE	<i>Java Agent Development Framework.</i>
JTM	<i>Jade Master Terminal.</i>
LCFS	<i>Last Come First Served</i>
LIFO	<i>Last In - First Out.</i>
LNG	<i>Liquefied Natural Gas.</i>
LP	<i>Linnear Programming</i>
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas.</i>
LSF	<i>Low Size First.</i>
MAS	<i>Multi Agent Systems.</i>
MBPP	<i>Master Bay Plan Problem.</i>

MINLP	<i>Mix Integer Non-Linear Programming.</i>
MIP	<i>Mixed Integer Programming.</i>
MPSF	<i>Multiparadim Platform Simulation Framework.</i>
MST	<i>Minimal Spanning Tree.</i>
OBC	<i>Overhead Bridge Crane.</i>
OBO	<i>Ore-Bulk-Oil carrier.</i>
OORP	<i>Object Oriented Reactive Programming.</i>
OR	<i>Operational Research.</i>
OBC	<i>Overhead Bridge Crane.</i>
OOP	<i>Objet Oriented Programming.</i>
OTS	<i>Overall Timer Shortening.</i>
PBIP	<i>Plan de Protección de Buques e Instalaciones Portuarias.</i>
PISCP	<i>Pricing, Inventory & Scheduling Combined Problem.</i>
QCAP	<i>Quay Crane Allocation Problem.</i>
QCSP	<i>Quay Crane Scheduling Problem.</i>
QNM	<i>Queueing Network Models</i>
QT	<i>Queueing Theory</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification.</i>
RHH	<i>Rolling Horizon Heuristic.</i>
RMG	<i>Rail Mounted Gantry Crane.</i>
Ro-Ro	<i>Roll on – Roll off.</i>

RPN	<i>Risk Priority Numbers.</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology.</i>
RSP	<i>Routing and Scheduling Problem.</i>
RTG	<i>Rubber Tired Gantry Crane.</i>
SARIMA	<i>Seasonal Autoregressive Integrated moving average.</i>
SBL	<i>Ship-Berth-Link.</i>
SC	<i>Straddle Carrier.</i>
SD	<i>System Dynamics.</i>
SEA	<i>Strategic Enviromental Assesment.</i>
SIFBUP	<i>Simulación del Flujo de personas y vehículos en BUques de Pasaje.</i>
SIMAN	<i>SIMulation & Analysis.</i>
SIRO	<i>Service In Random Order</i>
SJF	<i>Shortest Job First.</i>
SLAM	<i>Simulation Language for Alternatives Modelling.</i>
SLX	<i>Simulator Language with eXtensibility,</i>
SR	<i>Stacker – Reclaimer.</i>
SMQLD	<i>Seaside Modelling and Quay Layout Design</i>
SOLAS	<i>Convention for the Safety of Life at Sea.</i>
SSS	<i>Short Sea Shipping.</i>
STTP	<i>Shortest ship Turn-down ratio Time Policy</i>
SVM	<i>Support Vehicle Machine</i>
TMS	<i>Terminal Management System.</i>

TOMICS	<i>Traffic Oriented MICroscopic Simulator.</i>
TOR	<i>Termonal Operating System.</i>
TPC	<i>Taiwan Power Company.</i>
TMS	<i>Terminal Management System.</i>
YAP	<i>Yard Allocation Problem.</i>
YCAP	<i>Yard Crane Allocation Problem.</i>
YCSP	<i>Yard Crane Scheduling Problem.</i>
ULCC	<i>Ultra Large Crude Carrier.</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System.</i>
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development.</i>
VaR	<i>Value at Risk.</i>
VLCC	<i>Very Large Crude Carrier.</i>
VLE	<i>Virtual Laboratory Enviroment</i>
VPL	<i>Vissual Programming Lenguage</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problem.</i>
VSS	<i>Value of Stochastic Solution.</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WSC	<i>Winter Simulation Conference.</i>

Introducción

Introducción

Motivos y organización del estudio

Tras más de cincuenta años de continuo desarrollo, las técnicas de simulación están hoy ampliamente extendidas en todos los campos de actividad y en distintos sectores económicos.

Sin duda este proceso ha estado favorecido por el extraordinariamente rápido progreso de las técnicas de computación; potencia, rapidez, usabilidad y accesibilidad de estas herramientas. La gestión de empresas en entornos marítimo-portuarios, tanto en el ámbito público como el privado, no ha sido ajena a esta evolución y hoy en día la simulación ha sido importada con éxito a este campo, donde algunas de las características intrínsecas del sector las han hecho especialmente adecuadas para la incorporación de estas técnicas.

Adicionalmente, la velocidad de cambio en los procesos portuarios y la necesidad continua de optimización y crecimiento en un ambiente de súper-competitividad y de limitados recursos, han favorecido la penetración de la simulación convirtiéndola en una herramienta esencial en la toma de decisiones.

La simulación portuaria sin duda sobrepasa la capacidad de los métodos analíticos y estadísticos utilizados tradicionalmente en planificación, diseño y gestión de operaciones portuarias tales como los métodos de índices de explotación o las técnicas basada en teoría de colas (modelos basados en tiempos de espera; tráfico de saturación, congestión y límite; formulaciones con funciones de coste; etc.); permitiendo un análisis “*ad hoc*” e individualizado que huye de soluciones generalistas y permite tener en cuenta las peculiaridades y características del espacio portuario sometido a estudio.

Sin embargo, en contraposición a estos métodos analíticos y a pesar de que con carácter individual las referencias bibliográficas que describen o proporcionan ejemplos de utilización de simulación en entornos portuarios es muy amplia, no hemos encontrado ningún texto que explique, organice y proporcione una compilación de resultados presentando de esta manera una visión global de la utilización de modelos en entornos portuarios.

Esta tesis doctoral pretende solventar dicha carencia.

Con este objetivo hemos dividido la tesis doctoral en cinco grandes apartados.

En uno primero, que sirve de introducción a la modelización, tras comenzar con unos conceptos básicos de simulación, abordamos los orígenes, historia y evolución de las técnicas de simulación desde sus comienzos hasta nuestros días; presentando finalmente las herramientas hoy disponibles.

En un segundo capítulo nos introducimos ya en la aplicación de modelos de simulación en puertos y terminales, conceptualizando y clasificando los modelos en un primer paso para después describir tanto los modelos de propósito específico realizados para puertos como la aplicación de otros métodos de propósito general que han sido aplicados en determinadas experiencias prácticas portuarias. Revisaremos tanto lenguajes de programación como lenguajes de simulación para terminar con los más específicos simuladores comerciales que se han desarrollado al amparo de los dos primeros. En este capítulo reservamos un espacio para discutir las referencias bibliográficas, no muchas, que han tratado de comparar la utilización de procedimientos analíticos clásicos con los resultados obtenidos con la simulación.

En un tercer capítulo abordamos separadamente la simulación de entornos marítimo – portuarios bajo los distintos paradigmas de programación comúnmente aceptados en el mundo científico: la simulación mediante técnicas de eventos discretos (o “DES” de *Discreet Event Simulation*), la simulación basada en agentes (o “ABS” de *Agent Based Simulation*) y la simulación basada en Sistemas Dinámicos (o “SDS” de *System Dynamic Sumulation*). En este capítulo, al margen de los entornos de simulación pura bajo los paradigmas anteriores veremos como en últimas fechas se han empezado a implantar otros sistemas como los modelos de emulación y los prototipos o modelos físicos.

En un cuarto capítulo nos adentramos en la simulación de subcampos de actividad específicos en el universo marítimo-portuario que no han sido objeto de estudios recopilatorios previos. Efectivamente muchos son los estudios de compilación que se han publicado en el caso de las terminales de contenedores, existiendo un vacío científico relevante a nuestro entender en el caso de otro tipo de terminales. Revisaremos específicamente los ejercicios de simulación y optimización que se han publicado tanto para graneles solidos como para graneles líquidos (que dividiremos en crudo y productos petrolíferos, GNL y otros graneles líquidos). De igual modo se analizarán otras terminales especializadas como las Ro-Ro, de vehículos, de ferries y pasajeros; terminando con las terminales polivalentes y de mercancía general no contedorizada.

Finalmente, y como resumen de todo lo abordado a lo largo del texto, finalizamos con unas conclusiones, contribuciones de la presente tesis doctoral y reflexiones de futuro en este campo.

Como anejo de la tesis incluimos un apartado para repasar los modelos analíticos basados en teoría de colas y que son, en gran parte, la base teórica y metodológica en el que se basan los modelos computacionales que tratamos en la tesis. En este anejo, tras revisar los principios básicos de la teoría de colas, se ofrecerán las soluciones (exactas o aproximadas) para cada uno de los sistemas que se pueden formularse bajo esta teoría clásica. Tratamos de igual modo los métodos de capacidad económica y otros modelos complejos basados en teoría de colas (redes de colas, procesos markovianos, modelos cíclicos y sistemas con llegadas en bloque).

Finalidades y Objetivos de la tesis doctoral

Los objetivos de la tesis, así planteados en el plan de trabajo aprobado, cubrían dos aspectos diferenciados:

- En un primer plano se trataría de describir el estado actual del conocimiento en el campo de la modelización portuaria, describiendo en detalle el estado del arte y su evolución e identificando un marco de referencia completo que permitiera una clasificación sistemática de esta materia tan amplia. Este objetivo ha sido cumplido con los cuatro primeros capítulos de la tesis doctoral.
- En un segundo plano se abordarían aquellos aspectos tratados deficientemente en la literatura científica (por ejemplo y como hemos citado el desarrollo de modelos en ambientes portuarios tales como graneles sólidos o líquidos), fijando el punto de partido (estado de conocimiento actual) y formulando posibles campos de expansión científica. Este objetivo ha sido alcanzado en el capítulo quinto de la tesis doctoral.

De igual modo y dado que uno de los objetivos del Programa es “*formar investigadores capaces de publicar sus trabajos en revistas académicas presentes en el Journal of Citation Report (JCR)*.” el Doctorando se planteó como objetivo enviar al menos dos artículos a revistas presentes en el JCR.

Este objetivo ha sido cumplido, siendo el resultado de estos trabajos la siguiente producción científica en los que el autor es el autor principal en las tres primeras referencias:

Título	Revista	Apartado de la tesis doctoral	Fecha de Envío y de Aceptación
<i>Optimization of LNG supply chain: a literature overview.</i>	Transportation Science	Capítulo 4.3 de la presente tesis doctoral (pp: 590-620)	12/05/2017 Pendiente de Aceptación

<i>Operations research at dry bulk terminals: a literature update on simulation</i>	Simulation: Transactions of the society for modeling and simulation international	Capítulo 4.2 de la presente tesis doctoral (pp: 508-577)	01/11/2017 Aceptado en revisión
<i>A bibliographic review on simulation and operations research: crude oil port operations</i>	Investigación Operativa	Capítulo 4.1 de la presente tesis doctoral (pp: 580-589)	27/07/2017 Pendiente de Aceptación
<i>La costa Oeste de Latinoamérica: Análisis de eficiencia portuaria</i>	Journal of Globalization, Competitiveness & Governability. Georgetown University- Universia	Transversal a contenidos de toda la tesis.	Aceptado 06/03/2018 (publicación 2º trimestre 2018 en volumen 12, nº 2)

Metodología

La metodología seguida en la tesis doctoral ha sido fundamentalmente exploratoria (de revisión intensiva bibliográfica) y de organización histórica (por fecha) y sectorial (por subcampo de actividad dentro del universo portuario).

Proceso de recopilación bibliográfica

Como todo proceso de investigación basado en revisión bibliográfica, en un primer paso se han localizado las fuentes disponibles, para en un segundo paso proceder a buscar las referencias bibliográficas que abordan la materia.

Obviamente en la selección de fuentes se ha tenido en cuenta la trascendencia de la misma, su índice de impacto y la relevancia del autor.

Una vez identificadas estas fuentes y recopiladas las referencias se ha procedido a su análisis crítico escogiendo las auténticamente relevantes desde el tipo de visto científico y desechando aquellas con escaso valor o escasa relación con la materia.

Una vez obtenidas dichas fuentes se han clasificado por apartados y se ha procedido a realizar el informe escrito exponiendo los resultados de la revisión bibliográfica efectuada.

En todo el proceso se ha seguido un método de árbol o cascada en el que de la selección de unas fuentes bibliográficas concretas y consultando sus referencias bibliográficas y citas hemos ido conformando un amplio abanico de publicaciones y producción científica, abarcando con ello el mayor conjunto de trabajos publicados posible.

Como resultado final de este trabajo, un total de 1.769 referencias bibliográficas han sido incorporadas a la presente tesis doctoral reuniéndose todas en un apartado de bibliografía general pero, a su vez, referenciándose al final de cada capítulo aquellas que han sido citadas en cada uno de dichos apartados.

Método de organización histórico

Mediante este método científico-histórico hemos analizado la evolución y desarrollo de los modelos portuarios (analíticos o computacionales) revelando su historia, las etapas principales de su desarrollo y las conexiones entre unas y otras herramientas. Hemos analizado la trayectoria histórica de este campo y como se han ido implementando sucesivas mejoras o desarrollos científicos siguiendo un criterio puramente secuencial.

Método de organización sectorial

Por su interés en cuanto a la organización del trabajo, también se ha implementado un criterio de clasificación por sub-sectores de actividad dentro del campo portuario que ayudara a cumplir el segundo de los objetivos de la presente tesis.

Efectivamente, como ya sabíamos, las terminales de contenedores son los ambientes en los que la simulación más ha penetrado dentro del campo portuario y el que más textos científicos ha originado, incluyendo textos recopilatorios relativamente recientes.

Sin embargo otro tipo de terminales no han sido objeto de estudios tan exhaustivos y, en ningún caso, de textos compilatorios que reunieran las experiencias concretas en cada uno de estos subcampos de actividad.

Por ello, una vez seleccionado el material para la tesis doctoral, se ha clasificado éste por el tipo de terminal que somete a estudio incluyendo terminales de graneles sólidos, graneles líquidos, mercancía general no contenedorizada, terminales de pasajeros y ferries y terminales vehículos y Ro-Ro.

Quedan fuera de este análisis los tráficos no comerciales (nos referimos a avituallamientos, tráficos ligados a la náutica deportiva e instalaciones asociadas a la pesca), en donde la simulación se antoja una herramienta menos relevante.

Prólogo

Los puertos son instalaciones esenciales de las redes de transporte y elementos claves en las infraestructuras de la región donde se asientan. Si, además, las instalaciones portuarias son de cierta dimensión adquieren importancia nacional o supranacional. En todo caso, contribuyen de una manera muy notable a la competitividad de la región donde están enclavados y son polos de actividad destacados y nodos imprescindibles en las relaciones comerciales entre regiones. Las actividades que en estas infraestructuras se desarrollan contribuyen de manera decisiva en la economía productiva de su área de influencia al tiempo que tienen una gran influencia en la fisonomía urbana y modelo territorial dejando una huella espacial indudable.

Por todo ello, la optimización de las instalaciones portuarias debe ser un objetivo prioritario en el ámbito de las políticas públicas desde una perspectiva multicriterio: promoción industrial, desarrollo económica, equilibrio territorial, dotación logístico-infraestructural, planeamiento urbanístico, protección ambiental, etc.

Además, en estas instalaciones actúan un gran número de agentes económicos y entre ellos se establecen continuas interacciones con intercambios físicos y de información. Estas interacciones son además complejas, respondiendo a relaciones no lineales y en muchos casos cubriendo sucesos de naturaleza estocástica.

Las necesidades logísticas son, por su propia naturaleza, cambiantes y las mejoras tecnológicas constantes. Esto hace que la dinámica de desarrollo de los puertos sea continua y provoca que aquellas soluciones que son válidas en la actualidad dejan de ser competitivas en plazos relativamente cortos. Es necesario dotar de nuevos medios que proporcionen mayores rendimientos, proveer de más espacios para atender las necesidades de una demanda creciente, reorganizar espacios y métodos de trabajo, etc.; todo ello en un ambiente de supercompetitividad entre instalaciones portuarias y entre éstas y otros modos de transporte.

Esta optimización que se veía necesaria desde la esfera pública se replica por tanto en el sector privado.

Hasta hace pocas décadas, esta optimización se realizaba confiando en el conocimiento o intuición de los gestores portuarios quienes acudían a soluciones de tipo analítico o a los resultados de experiencias previas en ambientes similares.

La capacidad de predecir el comportamiento o los resultados de las medidas diseñadas era muy limitada y, en todo caso, circunscrita a un catálogo de soluciones estándar aplicables a un conjunto de instalaciones “tipo” de las mismas características y bajo las mismas simplificaciones y reglas de actuación.

Estas limitaciones, la mayor complejidad de las relaciones y la aceleración de los cambios hicieron que esta aproximación dejase de proporcionar soluciones adecuadas. La aparición y universalización del ordenador y ciencias computacionales, hicieron que la simulación penetrase de pleno en el campo portuario. Efectivamente, las necesidades de este sector y sus propias características, le hacen un candidato idóneo para ser escrutado bajo estas técnicas.

La presente tesis doctoral tiene como objetivo ver como las técnicas de simulación y optimización han penetrado en este sector de actividad, proporcionando una profunda revisión bibliográfica y un recorrido histórico desde sus inicios al estado del arte actual.

En el curso de la investigación se han puesto de manifiesto diversos planos cuando se trata de profundizar en la simulación portuaria. Esto ha llevado a organizar la tesis en una serie de capítulos que responden a cada uno de estos apartados.

En el primero de todos, que sirve para enmarcar los siguientes capítulos, se realiza una introducción a la simulación y se sientan las bases de sus conceptos básicos y describe su evolución histórica desde los primeros modelos de mediados del siglo XX hasta los actuales. En este primer capítulo se clasifican los modelos, se describen lenguajes de simulación y simuladores (en contrapunto a los lenguajes de programación) y se introducen los paradigmas de simulación más relevantes.

En el segundo capítulo, abandonando ya aspectos generales, se discute el uso de la modelización y simulación en entornos portuarios, estableciendo una clasificación y evolución de los mismos. En esta sección se describen que herramientas, de propósito general o especial, existen en la actualidad para abordar un ejercicio de simulación en un puerto o terminal portuaria.

El tercer capítulo resulta un elemento nuclear del trabajo. En el mismo abordamos los modelos desde la perspectiva del paradigma de programación que utilizan. Efectivamente, si bien históricamente la utilización de las técnicas de *eventos discretos* ha sido la más extendida; a finales del siglo XX surgen dos técnicas que, cada vez más, están penetrando en el campo portuario. Se trata de la *simulación basada en agentes* y las técnicas de *simulación dinámica*. En esta sección se reservan epígrafes específicos para cada uno de los paradigmas citados y se describen las realizaciones que pueden encontrarse en cada uno de ellos, estableciendo sus diferencias y campos de actuación prioritarios.

El cuarto capítulo se adentra en el tema objeto de investigación desde una perspectiva especializada analizando no las características propias del modelo (foco del tercer capítulo en el que se clasificaban los modelos por su paradigma) sino de las instalaciones. En efecto, en esta parte del trabajo se agrupan los modelos conforme las instalaciones que estudian y se aborda un análisis de los modelos contruidos en diferentes terminales (de contenedores, de graneles

líquidos, graneles sólidos, pasajeros, Ro-Ro, terminales de automóviles, etc...). Este capítulo trata, además, de solventar un importante vacío científico. Si bien históricamente se han realizado diversas recopilaciones sobre la modelización en el entorno de terminales de contenedores; esto no ha ocurrido en otras terminales especializadas, donde el número de trabajos que se han publicado es mucho menor y, hasta lo que se ha podido descubrir, no han sido objeto de textos recopilatorios específicos que los investiguen específicamente.

El quinto y último capítulo de la tesis se dedica a sintetizar las conclusiones y proponer futuras líneas de investigación.

Como apéndice de la tesis se incluye un anejo dedicado a describir los procedimientos analíticos basados en teoría de colas; técnicas que, en gran medida, son la base metodológica que subyace en los simuladores, lenguajes y ejercicios de simulación que en entornos portuarios se han desarrollado. En este anejo se trata, más que describir la propia teoría de colas, algo sobre la que hay innumerables textos científicos y académicos y poco podría aportar esta tesis doctoral, establecer las bases de su utilización en entornos portuarios tratando de explicar el comportamiento de estos espacios desde una perspectiva más analítica.

Capítulo 1

Introducción a la Simulación: Conceptos Básicos y evolución Histórica

1.1 Concepto de modelización, su proceso y calibrado.

Un modelo es una representación simplificada e ideal de un sistema; de tal modo que el modelo es suficientemente parecido a la realidad que representa (pero más simple que ésta) lo que permite operarlo y comprenderlo de una manera más sencilla.

Los modelos ayudan a resolver problemas en los que la solución no existe o, al menos, en los que las soluciones se calculan de una forma más sencilla y suficientemente precisa mediante las expresiones que representan el modelo que con las que se pudieran formular y calcular en la realidad (si es que pudiera hacerse).

A su vez, en el presente contexto, una simulación de un sistema es una operación del modelo que representa dicho sistema que se usa para predecir la evolución del mismo (identificar cuellos de botella, su rendimiento, infra o sobre-explotación de recursos,...) antes de que se produzcan cambios en éste o, incluso, antes de que la realidad exista; de tal manera que se pueda optimizarlo, predecir su comportamiento y tomar las decisiones más correctas.

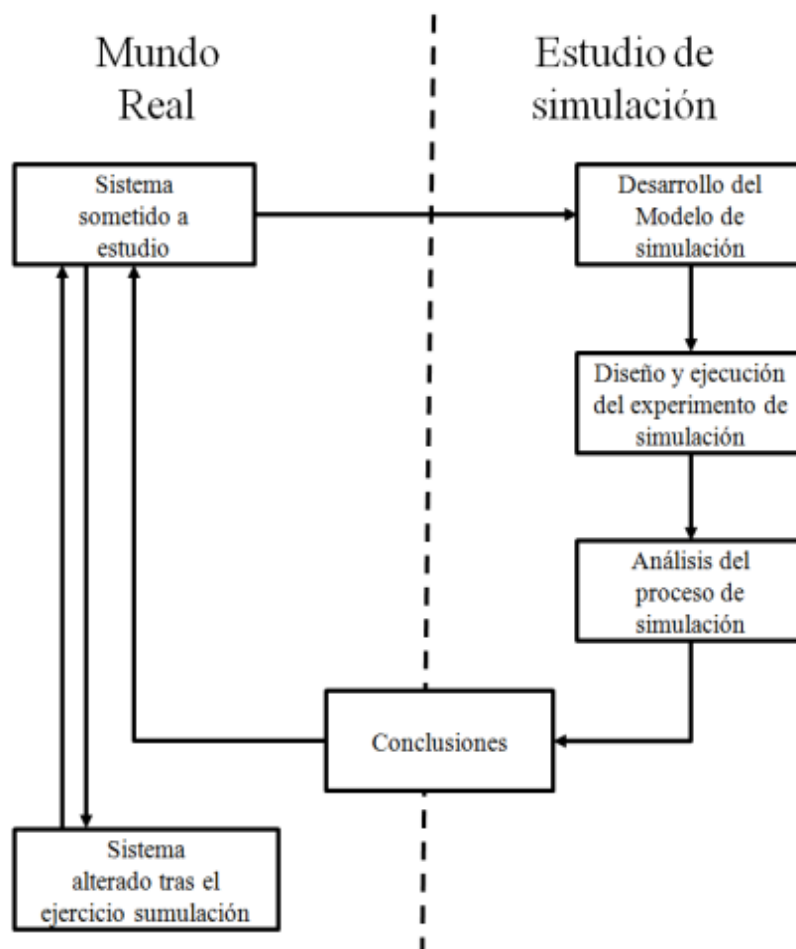
Según aborda María (1997) en su artículo de introducción a la modelización y la simulación, los once pasos en los que se puede dividir todo proceso de modelización mediante simulación son los siguientes:

- Paso 1: Identificación del problema.
- Paso 2: Formulación del problema.
- Paso 3: Recopilación de datos reales del sistema.
- Paso 4: Formulación y desarrollo del modelo.
- Paso 5: Validación del modelo.
- Paso 6: Documentación del modelo para su uso futuro.
- Paso 7: Selección de un diseño experimental apropiado.
- Paso 8: Establecer las condiciones experimentales para correr el modelo.
- Paso 9: Correr el modelo.
- Paso 10: Interpretar y presentar los resultados.
- Paso 11: Recomendar futuras acciones en relación al modelo de simulación.

Este autor, en ese mismo trabajo, enmarca a su vez los pasos anteriores en tres fases: desarrollo del modelo de simulación (pasos 1 a 6), diseño y ejecución del experimento de simulación (pasos 7 a 9) y análisis del proceso de simulación (pasos 10 a 11); y define todo proceso de simulación como iterativo siguiendo el esquema de la ilustración 1; en el que tras la ejecución de un primer bucle en el que se completan las tres fases anteriores se llega a unas conclusiones y, por comparación entre los datos reales del sistema (si es que ya existe) y los resultados obtenidos con la simulación, es posible optimizar el modelo, reformulándolo y afinándolo.

Este proceso iterativo comparando los resultados del modelo con los que se obtienen del sistema real con esos mismos datos que han alimentado el modelo se denomina proceso de calibrado del modelo.

Ilustración 1. Orígenes, historia y evolución de las técnicas de simulación.



Fuente: Elaboración propia.

1.2 Breve historia de la simulación.

1.2.1 Los orígenes de la simulación.

Según Goldsman *et al.* (2009)¹ se pueden distinguir tres periodos distintos en la historia de la simulación: la época previa al computador (que abarcaría entre 1777 y la Segunda Guerra Mundial – 1945), la época de formación o desarrollo (1945-1970) y la época de expansión comenzando en la década de los 70².

Efectivamente, suele admitirse que las técnicas de simulación nacieron en 1777, cuando *Georges Louis Leclerc*, (conde de Buffon) (1707-1788) trató de resolver el valor del número “ π ” por aproximaciones mediante una técnica sencilla de ensayos (problema de “*La abuja de Buffon*”).

Más tarde y con objetivos comerciales los modelos se aplicaron con éxito por el estadista descubridor de la distribución t-Student³, William Sealy Gosset (1876-1937) en el campo de la ingeniería agrícola.

Este investigador aplicó estas técnicas para la selección de las mejores variedades para el cultivo de la cebada en la destilería de cerveza de Arthur Guinness y fue quizá el precursor de la aplicación práctica de la simulación en el campo del proceso de control industrial.

Más adelante, ya en siglo XX las técnicas de simulación fueron estimuladas a mediados de la década de los años 40 por la aparición del primer computador (construcción del primer computador electrónico de propósito general ENIAC) y por el desarrollo del método Monte Carlo, método estadístico numérico (no determinístico) enunciado en 1944 por Stanislaw Ulam y John Von Neumann inicialmente desarrollado para usos militares⁴ pero que se ha extendido de una manera muy notable en el campo civil con el desarrollo de la computadora.

En esencia, el método se usa para aproximar expresiones matemáticas complejas cuya evaluación con exactitud no es posible o es muy costosa (en términos de potencia de cálculo) y mediante el mismo se pueden encontrar soluciones aproximadas a una multitud de diferentes problemas.

1 Este artículo es revisado por los mismos autores un año después Goldasman et al. (2010) y publicado en el mismo foro.

2 Estos autores limitan su trabajo a un análisis de la historia de simulación hasta el año 1981, por lo que no hacen ningún tipo de diferenciación en etapas posteriores a ésta.

3 W. S. Gosset se vio obligado a escribir bajo el pseudónimo de Student ya que Arthur Guinness había prohibido a sus trabajadores realizar tareas de difusión científica de sus resultados una vez que otro investigador de la firma había desvelado secretos industriales con anterioridad.

4 Aplicación práctica para solucionar problemas de difusión de neutrones en el diseño y desarrollo de la bomba de hidrógeno

Como norma general se utiliza para realizar investigaciones sobre la base de experimentos muestrales mediante la generación de múltiples series pseudo-aleatorias o escenarios en una computadora. Una de las ventajas de este método es que el error absoluto de la estimación decrece con el número de puntos evaluados (“N”) mediante la relación $1/N^{1/2}$ en virtud del teorema central del límite.

A partir de 1950 el incremento de la disponibilidad de ordenadores y las técnicas de análisis numérico llevaron a una rápida proliferación de diferentes herramientas de simulación y su extrapolación a otras disciplinas.

El análisis numérico moderno comenzó a finales de la década de los 40, cuando John von Neumann y Herman Goldstine publicaron su artículo “*Numerical Inverting of Matrices of High Order*” (Neumann y Goldstine, 1947). Este trabajo, primer artículo de una serie que le seguirían a continuación, es el comienzo de lo que hoy se conoce como ciencia computacional.

1.2.2 Primer lenguaje de simulación: GSP (1958) (“*General Simulation Program*”).

Nadie parece discutir que el profesor de investigación operativa de la Universidad de Southampton, Keith Douglas Tocher (1921–1981) fue el pionero en desarrollar aplicaciones específicas de simulación en sus trabajos para *United Steel Company* in Sheffield (Reino Unido). Así, en 1958 desarrolla el GSP (“*General Simulation Program*”) ideado para simular el funcionamiento completo de una planta de producción. Tal y como describen Goldsman *et al.* (2009) citando a Tocher y Owen (1960), el GSP es un modelo de simulación de eventos–discretos (más adelante se describirá en qué consiste esta técnica que genéricamente se referencia en la literatura científica como modelos DES de su acrónimo en inglés “*Discrete Event Simulation*”) con el que se simulaba el funcionamiento completo de una planta de producción donde las máquinas hacían ciclos pasando por diferentes estados: Ocupado, Esperando, No disponible y Fallo; de manera que las simulaciones en los cambios de estado de las máquinas marcaban el estado definitivo de la producción de la planta. El diagrama de proceso de dicho modelo se muestra en la ilustración 2.

1.2.3 Sistemas Dinámicos. Lenguaje de simulación DYNAMO (1959).

Siguiendo con una cronología histórica, en lo que se refiere a las técnicas de simulación modernas utilizando computadores es necesario mencionar al ingeniero eléctrico Jay Wright Forrester (Anselmo, Nebraska, 1918) y sus trabajos como profesor e investigador en el *Massachusetts Institute of Technology* (en adelante MIT).

J.W. Forrester al final de la segunda guerra mundial comenzó a investigar técnicas de simulación mediante computadora en unas primeras aplicaciones de carácter militar. Así crea un primer simulador de vuelo para la *U.S. Navy* y más tarde un sistema de información para el combate computarizado.

En 1947 se funda el *MIT Digital Computer Laboratory* bajo la dirección del propio J.W. Forrester, siendo su primer encargo la creación de WHIRLWIND I, el primer computador digital de propósito general del MIT.

En paralelo J.W. Forrester inventó y patentó el *coincident-current random-access magnetic computer memory*, antecesor de la hoy conocida como memoria RAM.

Tras el éxito de WHIRLWIND I, se encarga a J.W. Forrester que lidere una división del Laboratorio Lincoln del MIT para crear unos computadores con el objetivo de proporcionar un primer sistema de defensa aéreo conocido como *North American SAGE (Semi-Automatic Ground Environment)* que se instaló a finales de los años 50 y ha estado en servicio por más de 25 años.

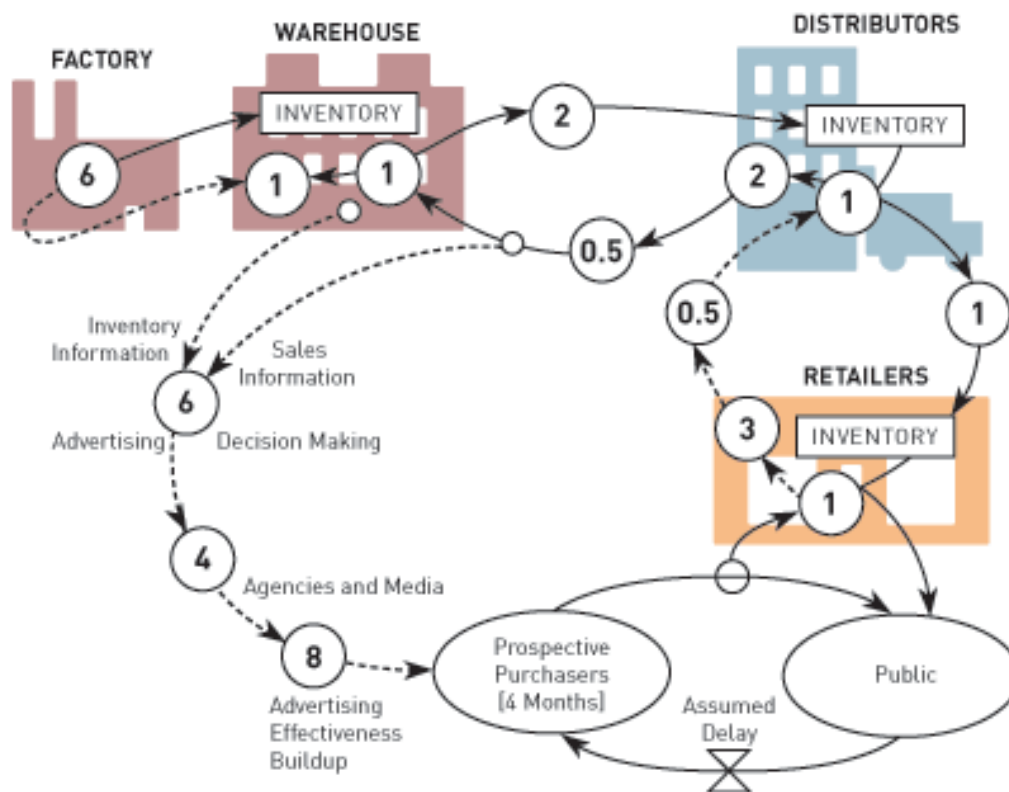
Saltando al campo civil, J.W. Forrester es hoy en día reconocido como el padre de la dinámica de sistemas (“*System Dynamics*” o “SD” tal y como se le conoce en el campo de investigación operativa) otro de los puntos de partida de la simulación moderna, creando en 1956 el *MIT System Dynamics Group* y difundiendo sus resultados por primera vez en un texto académico completo bajo el título de “*Industrial Dynamics*”, que se referencia en Forrester (1961).

Mediante la dinámica de sistemas se analizan y modelizan entornos complejos, basándose en la identificación de bucles de retroalimentación entre los elementos que lo componen. J.W. Forrester desarrolló la teoría tras un ejemplo práctico para *General Electric* donde estudió el ciclo productivo de la empresa tratando de resolver ciertos problemas que se ponían de manifiesto en la cadena de suministro.

En la ilustración 3 se puede observar el primero de los modelos que Forrester desarrolló para construir el modelo conforme se reproduce en Fisher (2005). En el mismo incluía los distintos “edificios” (fábrica, almacenes, centros de distribución y vendedores finales) en los que se almacenaban los distintos “*stocks*” de la compañía. Las líneas punteadas representaban flujos de

información mientras que las líneas sólidas flujos de mercancía. En los círculos, los números representan el número de semanas requeridas en cada paso.

Ilustración 3. Modelo de dinámica de sistemas.



Fuente: Fisher (2005).

Bajo la influencia de J.W.Forrester y su dinámica de sistemas, se crea en el centro de computación del MIT el lenguaje de simulación DYNAMO ("DYNAmic MOdels") que fue desarrollado a finales de los 50 por, entre otros, Phyllis Fox, Alexander L. Pugh y Grace Duren bajo la dirección del propio J.W.Forrester.

Este lenguaje de simulación es presentado científicamente en 1959 y se desarrolló en primera instancia sobre un primer lenguaje de modelado dinámico, desarrollado por Richard Bennett en 1958 conocido como SIMPLE ("*Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations*")⁵.

⁵ Véase Reilley (2003).

Tras la primera versión de 1959 se desarrolla un año después una segunda (DYNAMO II) escrita ésta en un dialecto del ALGOL-60 desarrollado por el MIT y denominado AED-0⁶. Será Pugh (1963) quien escribe el primer manual de usuario que se ha encontrado.

Este lenguaje de simulación ha sufrido distintas evoluciones hasta su última versión documentada a mediados de la década de los 90. Así, se puede citar DYNAMO II/F (1971) y DYNAMO III (1976) que generaban ya códigos transportables a FORTRAN mejorando su interconexión con otros sistemas explicándose su utilización con carácter práctico en Richardson y Pugh (1981). A estas versiones de los 70 les siguen los evolutivos de los 80 como DYNAMO IV (1983) y el Professional DYNAMO Plus (1986) cuyo manual de referencia se recoge en Pugh (1986). Actualmente y pese a haber desarrollado versiones para utilización en ordenadores personales y microcomputadores (como el micro-DYNAMO desarrollado en 1994) es un lenguaje de simulación que ha caído prácticamente en desuso. Se debe, no obstante, destacarlo pues ha dado cuerpo a un campo científico muy extendido de la simulación dentro del área del urbanismo, sociología y ecología. Al margen de esto, la desactualización del simulador DYNAMO no ha llevado al olvido de las técnicas SD, toda vez que otros simuladores o lenguajes de simulación se basan en los conceptos de esta técnica desarrollada por J.W. Forrester.

Efectivamente, DYNAMO, pensado en un inicio para entornos industriales, fue extendido a otros ambientes, especialmente el del urbanismo, campo este último donde ha tenido una gran influencia, destacando inicialmente el trabajo conjunto que desarrollaron el propio Forrester y John Collins (antiguo alcalde de Boston que tras dejar la alcaldía se une como profesor invitado de Urbanismo en el MIT y trabaja de manera casual en estrecha colaboración del primero al ubicarse en un puesto físico vacante al lado del propio Forrester).

El fruto de esta colaboración se plasma en el libro “*Urban Dynamics*” (Forrester, 1969) que es reconocido como el primer modelo y simulación en el campo público con fines no puramente corporativos o empresariales y que fue muy debatido por algunas de sus conclusiones y por lo innovador de su metodología⁷.

El éxito de este trabajo y lo novedoso de su metodología lleva a que J.W. Forrester sea invitado por el Club de Roma⁸ para quienes desarrolla bajo DYNAMO el modelo conocido como *World*

⁶ AED corresponden al acrónimo de “*Algol Extended for Design*”.

⁷ J.W. Forrester analiza analíticamente políticas tradicionales aplicadas en el desarrollo urbano demostrando que algunas de las comúnmente aceptadas como políticas acertadas han producido o producirán efectos indeseables. Así en *Urban Dynamics* analiza como una política de construcción de viviendas de bajo coste para familias de baja renta crea en realidad una trampa de pobreza que produce un estancamiento de la ciudad y propone analíticamente como mejor solución el derribo de este tipo de viviendas de manera que se ayude a incrementar el estándar de vida de los habitantes de la ciudad.

⁸ El Club de Roma es una organización no gubernamental creada en 1968 por un conjunto de relevantes científicos y políticos y cuyo principal objetivo es contribuir a la mejora del mundo a largo plazo y cuyos primeros pasos se dieron en la ciudad de Roma debatiendo los cambios que se estaban produciendo en el planeta como consecuencia de la intervención humana. Hoy en día es considerado uno de los grupos más influyentes en el campo de la ecología y ambientalismo habiendo publicado más de una veintena de estudios y análisis entre los que destaca “*The limits to Growth*” (Meadows *et al.*, 1972) mencionado en esta tesis doctoral con posterioridad.

Forrester declinó participar pero propuso que fuese conducido por un equipo de colaboradores suyos del MIT liderados por la química y biofísica Donella H. Meadows (1941-2001).

Meadows y su equipo de investigación aplicaron técnicas de modelización mediante un modelo más refinado que los desarrollados por J.W. Forrester que denominaron WORLD3 y que también se basaba en DYNAMO. Aplican dicho modelo de simulación para el estudio de dinámica de poblaciones y sus límites de crecimiento, publicando el aún más difundido texto “*The Limits to Growth*” (Meadows *et al.*, 1972) donde a través de las simulaciones que realizaron llegaron a conclusiones ciertamente alarmantes y en la misma línea que las apuntadas por su maestro¹¹. Este último trabajo tiene, no obstante, una mayor repercusión y difusión que los de J.W. Forrester, probablemente porque la redacción dada al informe era más “suave” y comprensible no sólo para un experto en técnicas computacionales sino para una persona sin conocimientos técnicos específicos.

En 1991 Donella Meadows, Dennis Meadows y Jørgen Randers desarrollaron una nueva versión del modelo que denominaron WORLD3-91 y que publicaron en el libro “*Beyond the Limits:...*”, presentando unos resultados similares a sus antecesores *World Dynamics* y *The Limits to Growth* si bien utilizando en el modelo una cantidad muy significativa de datos que no existían a la fecha de elaboración de los primeros y con los que trataban de contrarrestar las críticas que se hicieron a dichos modelos iniciales y que, en gran parte, se basaban en esa falta de datos para contrastar y calibrar el modelo.

La influencia en el mundo de la simulación de los trabajos de J.W. Forrester y sus colaboradores ha perdurado en el tiempo y hoy en día la *System Dynamics Society* se encarga, entre otras cosas, de mantener tanto fondos bibliográficos actualizados como organizar eventos e inventariar productos bajo estas técnicas¹².

De igual modo, una compilación de la producción científica de J.W. Forrester en una selección de sus artículos más relevantes fue publicada por el propio autor en Forrester (1975) y más tarde en una actualización de carácter autobiográfica recogida en Forrester (1996) o en el reportaje que sobre la vida de éste realiza Fisher (2005) o el artículo de carácter científico-biográfico de Lane (2007).

¹¹ Meadows *et al.* (1972) en “*The Limits to Growth*” con técnicas de simulación inferían que en los ritmos actuales de crecimiento de la población, industrialización, contaminación, producción de alimentos y explotación de los recursos naturales se alcanzaría los límites absolutos de crecimiento en la Tierra en un periodo no superior a 100 años.

¹² Véase System Dynamics Society (2016).

1.2.4 GPSS (1961) (General Purpose Simulation System).

Como otro hito muy destacable (esta vez por su difusión), IBM desarrolló entre 1960 y 1961 el conocido como “Sistema de Simulación de Propósito General” o “*General Purpose Simulation System*” (GPSS) (previamente nombrado simplemente como GPS “*General Purpose System*” y así referenciado en sus orígenes).

Se trataba de un modelo de simulación de eventos a tiempo discreto que se diseñó para realizar simulaciones de teleprocesos tales como: control de tráfico urbano, gestión de llamadas telefónicas, reservas de billetes de avión, etc. y cuyo padre fue Geoffrey Gordon¹³ (de hecho, tal y como explican antes de adoptar el nombre de GPSS dentro de IBM se le conocía como el “*Gordon Simulator*” y el acrónimo GPSS se le atribuía a “*Gordon’s Programmable Simulation System*”¹⁴).

La sencillez de uso del GPSS, cuya arquitectura propia (no basada inicialmente en un lenguaje de programación de propósito general) toma como referencia la teoría de colas, hizo de este sistema el más popular lenguaje de simulación en esa primera época siendo una herramienta que ha sobrevivido al paso del tiempo y donde si bien es verdad que es menos flexible que otros lenguajes que se han desarrollado con posterioridad¹⁵, no es menos cierto que también resulta de más fácil utilización; lo que en cierta medida lo ha valido para su general utilización en programas de formación y aprendizaje de entornos de simulación. Las ventajas de este sistema son puestas de manifiesto con ocasión del 40 aniversario de su lanzamiento por Schriber *et al.* (2001), y Ståhl (2001) y más tarde y esta vez al cumplir este lenguaje sus bodas de oro en Ståhl *et al.* (2011).

IBM hizo evolucionar el primer modelo (1961) hasta 1975 donde dejó de dar soporte a este sistema. De entre estas versiones de IBM destaca la versión conocida como GPSS/V (1971) que había tenido sus antecedentes en la segunda versión del lenguaje o GPSS2 (1963), tercera o GPSS-III (1965) y cuarta o GPS 380 (1967).

Una vez que IBM abandonó su evolución empresas privadas e instituciones públicas y de investigación siguieron con su desarrollo. Así, según Ståhl *et al.* (2011), a principios del año 2000 existían tres conjuntos de aplicaciones que seguían los pasos de GPSS: el primer grupo el constituido por las versiones GPSS/H¹⁶ (y su sucesor SLX¹⁷), el segundo la familia de GPSS World y la tercera y última la versión educacional conocida como aGPSS.

¹³ Véase Gordon (1960) y Gordon (1961).

¹⁴ Véase Fonseca y Casanovas (2009).

¹⁵ Como por ejemplo SIMULA o SIMSCRIPT II.5.

¹⁶ Más información sobre GPSS/H puede consultarse en Banks *et al.* (1995).

¹⁷ Véase Henriksen (1993).

Efectivamente, este lenguaje empezó a tener un uso más generalizado tanto en enseñanza, como en investigación y aplicaciones prácticas cuando la empresa *Wolverine Software* creó en 1977 una nueva versión denominada GPSS/H, que se ideó para entornos IBM y se instaló en *General Motors*. De facto, el GPSS/H desplazó al GPSS/V puesto que *Wolverine* lo hizo evolucionar e introdujo mejoras con el tiempo. Así *Wolverine* fue desarrollando versiones en los años 1988 (GPS/H-2) y 1995 (GPS/H-3), así como distintos retoques para trabajo en diferentes entornos tales como VAX (1983), Unix workstations (1986), versión micro-PC para uso en ordenadores personales (1988), versiones para estudiantes (1989) y versión profesional (1990), originalmente lanzada bajo el nombre de GPSS/H 386.

En 1993 *Wolverine* hace evolucionar sustancialmente GPSS/H lanzando el software conocido como SLX (1) (1993) con nueva versión denominada SLX-2 en 2011.

EL GPSS presentaba como principal inconveniente con respecto a otros programas contemporáneos que luego analizaremos, que no contaba con una herramienta de animación incorporada, aspecto que la propia *Wolverine* resolvió al lanzar el software *Proof Animation*, paquete que no sólo puede animar modelos bajo GPSS sino de cualquier lenguaje o simulador que pueda producir códigos ASCII.

En otra línea paralela al desarrollo de GPSS/H por *Wolverine* nace GPSS/PC (1984) y su evolución a GPSSWorld (2000). GPSS World fue desarrollada por la casa comercial *Minuteman Software Inc.* e incorporaba una interface gráfica con un editor de texto embebido que hacía el uso de GPSS mucho más amigable, presentando una ventana con todos los bloques que se definen en el lenguaje de simulación y con ello facilitando la construcción del modelo.

Esta misma empresa desarrolló una versión para uso de estudiantes y no sujeta a licencia construida sobre su versión en sistema operativo DOS que denominaron GPSS/PC y que a la fecha de revisión de este capítulo está disponible en Minuteman Software (2010).

De igual modo, evolucionando directamente desde GPSS/360 (y por tanto no sucesor de GPSS/H) se desarrolla microGPSS (1978) del cual surgen dos subfamilias como son WebGPSS (1999) – WebGPSS-2 (2003) y WinGPSS (2003), ambas dando origen a una versión unificada denominada aGPSS (2011).

Esta familia fue desarrollada por Ingolf Ståhl y su equipo de la *Stockholm School of Economics* (Estocolmo, Suecia). WebGPSS presenta la ventaja de ser una versión de acceso libre desde internet por lo que está relativamente extendido en el mundo docente, campo para el que, además,

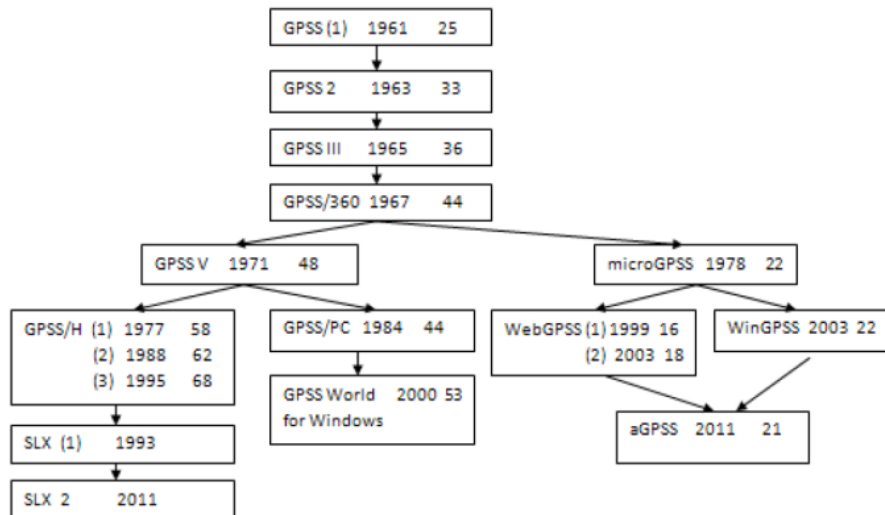
presenta una serie de simplificaciones que lo hacen idóneo desde el punto de vista educativo pero que lo limita para usos más avanzados¹⁸.

Para demostrar lo extendido de este sistema se puede citar un buen número de autores que han centrado sus investigaciones en el entorno GPSS. De entre los que lo hacen desde sus orígenes destacan Greenberg (1972) o Schriber (1974). De aquellos que se han centrado en sus sucesivas evoluciones y aplicaciones prácticas se resaltaría a Henriksen (1985) por su análisis de GPSS/85. Siguiendo a éste Cox (1991) analiza GPSS World, Ståhl (1992) y Herper y Ståhl (1999) se centran en micro-GPSS, Schriber (1995) autor que analiza de una manera más genérica las perspectivas de utilización de los entornos GPSS en el futuro, Crain (1997) y Crain y Henriksen (1999) abordan el universo GPSS/H, Ståhl (2001) y Schriber *et al.* (2001) en los ya citados análisis retrospectivos tras 40 años de desarrollo de este sistema, Born y Ståhl (2004) centran su análisis en la familia WebGPSS, Fonseca y Casanovas (2009) penetran en la evolución de GPSS conocida como JPSS, Ståhl *et al.* (2011) vuelven con sus análisis histórico al cumplirse 50 años de lanzamiento del sistema, o los más recientes Villareal *et al.* (2012) y Villareal (2013) que defienden una mayor utilización de estos sistemas en entornos educativos demostrando la vigencia del sistema a pesar de haber pasado más de 5 décadas de su lanzamiento.

Como corolario de este epígrafe y por ser especialmente interesante se incluye la ilustración 5 extraída de Ståhl *et al.* (2011) quienes presentan una genealogía completa de esta rica familia de herramientas de simulación originalmente desarrolladas por IBM. En cada casilla de la figura se representa primero el nombre, después el año de aparición y, por último, el número de diferente tipo de bloques que permite construir (con lo que se puede observar indirectamente la complejidad y capacidad del mismo).

¹⁸ Para ilustrar el alcance de estas simplificaciones se puede analizar la cantidad y tipo de bloques que puede generar WebGPSS (16 en su primera versión, 18 en la segunda y 21 en su evolución a aGPSS) frente a los 68 bloques de GPSS/3 o los 53 de GPSSWorld, datos que se extraen de Ståhl (2011).

Ilustración 5. Genealogía de GPSS.

Fuente: Ståhl *et al.* (2011).

1.2.5 SIMULA (1961) y el Norwegian Computing Centre. Orígenes de la programación orientada a objetos.

A su vez, el *Royal Norwegian Computing Centre*, apoyado por UNIVAC inició en 1961 el desarrollo del programa SIMULA, probablemente el lenguaje de simulación más relevante de toda la historia.

Su primera versión (SIMULA I) se basó en sus inicios en el lenguaje de programación ALGOL 60, pero pronto abandonaría esta senda para emprender una vida propia hasta considerarse hoy en día como el primer antecedente de la tan influyente programación orientada a objetos e inspirador de muchos lenguajes posteriores.

SIMULA fue presentado oficialmente en Munich por sus creadores en Nygaard y Dahl (1962) e instalado en una máquina UNIVAC 1107 en 1963.

Ciertos conflictos entre ALGOL 60 y SIMULA hace que sus creadores abandonen el desarrollo como producto ALGOL y se puede decir que es, en realidad, un lenguaje propio aunque basado en ALGOL tal y como los propios autores lo reconocen en Dahl y Nygaard (1966) al denominarlo como “*ALGOL-Based lenguaje*”. Efectivamente, poco antes (en 1964) había aparecido el primer compilador propiamente SIMULA y en 1965 el primer manual del que se conoce como SIMULA–I publicado en Dahl y Nygaard (1965).

Conforme Wikipedia – SIMULA (2016), los autores lo hacen evolucionar a una nueva versión (SIMULA 67) oficialmente presentada por ellos en la conferencia de trabajo en Lenguajes de

Simulación IFIO TC 2¹⁹, en Lysebu (Oslo) y formalmente estandarizada en el que sería la primera reunión del denominado “*SIMULA Standards Group (SSG)*” celebrada en Febrero de 1968.

Según Sklenar (1997), sus creadores muy pronto abandonaron su evolución (proyecto formalmente congelado en 1968), para comenzar a desarrollar un nuevo lenguaje de programación más tarde conocido como *BETA*²⁰ que fue liderado por el propio Kristen Nygaard junto con su colega Birger Møller-Pedersen, ambos de la que hoy se denomina la escuela escandinava de computación por desarrollar sus trabajos en el departamento de informática y computación de la Universidad de Oslo y el arriba ya mencionado *Norwegian Computing Centre*²¹.

La transición de SIMULA 67 a BETA fue presentada por los propios Nygaard y Møller-Pedersen junto con O.L. Madsen en su conferencia “*From SIMULA 67 to BETA*” recogida en Madsen *et al.* (1983) y a lo largo de las últimas décadas son muchas las referencias que se pueden encontrar de simulación y programación orientada a objetos utilizando el sistema *BETA* entre los que cabría destacar por orden cronológico Kristensen *et al.* (1976), el arriba mencionado Madsen *et al.* (1983) y los posteriores Dahle *et al.* (1986), Agesen *et al.* (1990), Madsen *et al.* (1993), Madsen (2016) y Brandt y Madsen (2016).

Volviendo a SIMULA, al margen de los autores ya citados, este es un sistema que siguió despertando el interés de la comunidad científica a pesar de la evolución a BETA ya mencionada y así se pueden citar las revisiones, explicaciones y análisis del sistema que presentan autores como Birtwistle *et al.* (1973), Nygaard y Dahl (1978), Nygaard y Dahl (1981), Pooley (1987), Kirkerud (1989) y Holmevik (1994). Al tiempo resultan especialmente interesantes las investigaciones de Sklenar (1997) quien proporciona una buena descripción de la evolución histórica del sistema.

La influencia de SIMULA fue también decisiva en otro lenguaje de programación que surge a principios de los años 70 denominado *Smalltalk*²². Este fue desarrollado por Alan Kay, Dan Ingalls, Ted Kaehler y Adele Goldberg en el Instituto de Investigación de Xerox en Palo Alto (California, Estados Unidos).

¹⁹ IFIO TC 2 es la abreviatura de “*Intentional Federation of Information Processing – Technical Committee No 2: Software – Theory and Practice*”.

²⁰ *BETA* es también conocido en determinadas referencias bibliográficas como “*The Mjølner System*” por el nombre de uno de sus desarrolladores. Así por ejemplo, viene definido en Dahle *et al.* (1986), Andersen *et al.* (n/a) y Madsen (2016).

²¹ Madsen *et al.* (1983) apuntan que el desarrollo de BETA fue formalmente iniciado en 1976 dentro de lo que por entonces se llamaba “*Joint Language Project*” por estar liderado por varias instituciones, a saber: el *Regional Computing Center* y el *Computer Science Department* de la Universidad de Aarhus (Dinamarca), el *Institute for Electronic Systems* de la Universidad de Aalborg (Dinamarca), el *Norwegian Computing Center* y la Universidad de Oslo (Noruega). La iniciativa de este proyecto se toma en otoño de 1975 por Bjarner Svejgaard, entonces Director del *Regional Computing Center*.

²² *Smalltalk* ha dado paso a una serie de implementaciones posteriores como son *VisualWorks*, *Squeak*, *VisualSmalltalk*, *VisualAge*, *Dolphin*, *Pharo Smalltalk* o *Smalltalk X* que no se tratarán en esta tesis pero que se citan en esta nota para tener un mayor detalle de la evolución histórica de estos sistemas.

En Kay (1993) se pueden encontrar los detalles de su evolución, que si bien comenzó en 1970 no contó una primera versión hasta 1972 (bajo el nombre de Smalltalk-72 y que este autor define como “*the first real Smalltalk*”) y con una primera evolución más relevante (denominada por éste como “*the first modern Smalltalk*”) del año 1976 (Smalltalk-76) y por otra de 1980 (Smalltalk-80).

El desarrollo de Smalltalk es contemporáneo al desarrollado de BETA compartiendo ambos el esquema de programación orientada a objetos introducido por SIMULA. A partir de la última versión del año 80 este producto sigue desarrollando en paralelo por un lado por Adele Goldberg que hace evoluciones a las que renombra como *ObjectWorks* y más tarde como *VisualWorks* y por Alan Kay que hace lo propio desarrollando *SqueakSmalltalk* y *Pharo*.

El lenguaje *Smalltalk* es tratado, al margen del ya referenciado Kay (1993) que contiene una ilustrativa descripción de los orígenes y evolución, por Goldberg (1983) quien describe la versión Smalltalk-80 como “*un ambiente de programación interactivo*”. LaLonde (1994) ofrece un texto completo con la descripción del programa útil para aquellos que quieren comenzar la programación en este sistema y Liu (2000) describe este lenguaje en un ámbito mucho más especializado para programadores.

Estos avances en paralelo (*BETA* y *Smalltalk*) no llevaron sin embargo a frenar en un principio la utilización de SIMULA, fundándose en 1973 la Asociación de Usuarios de SIMULA (“ASU” de *Assosiation of SIMULA Users*) con sede inicial en el *Royal Institute of Technology* de Estocolmo (Suecia) y a la celebración de congresos anuales. Así en 1983 ya se habían celebrado 11 congresos y en el año 1999 se celebraron las bodas de plata con la organización de su 25 congreso anual en Balaton (Hungría) momento en el que se pierde la pista de sus actividades²³.

No obstante, la vigencia de los conceptos introducidos por SIMULA 67 como origen de la programación orientada a objetos (y más tarde desarrollados por los referenciados *BETA* y *Smalltalk*) es hoy en día indudable, pudiendo considerarse como el punto de partida de otros lenguajes de programación posteriores de gran influencia como son *C*, *Eiffel*, *C++* o *Java*.

En efecto, si se quisiera listar por orden cronológico aquellos que han sido inspirados por SIMULA (al margen del ya descrito *Smalltalk*) se debería citar en primer lugar al lenguaje de programación *C*.

²³ La última referencia que ha podido encontrarse en la búsqueda realizada en el marco de esta tesis es la que tiene que ver con la celebración de este 25 congreso (ver [http://www.c3.hu/~simula/call_for_papers.html#Annual General Meeting](http://www.c3.hu/~simula/call_for_papers.html#Annual%20General%20Meeting) [fecha de último acceso el 01.10.2016]) no habiéndose encontrado posteriores contribuciones científicas en nuevos congresos y no estando disponible a la fecha de redacción del presente trabajo la página web de la ASU (referenciada en algunos enlaces) e inoperativa o deslocalizada su secretaria.

El sistema *C* fue desarrollado originalmente por Dennis M. Ritchie entre 1969 y 1972 en los Laboratorios Bell, representando una evolución del anterior lenguaje *B*²⁴ que a su vez estaba basado en *BCPL*²⁵ y éste en *CPL*²⁶. Al igual que *B*, se trata de un lenguaje orientado a la implementación de sistemas operativos (concretamente Unix) y no se considera un lenguaje de programación orientado a objetos propiamente dicho o, al menos, como hoy se les conoce.

Más tarde aparecería el lenguaje de programación *Eiffel*, desarrollado en la empresa *Eiffel Software* por Bertrand Meyer y que apareció en 1985 (Meyer, 1991). A diferencia de *C* este sí puede ser considerado como un lenguaje de programación orientado a objetos y muchos de los conceptos introducidos por este sistema pueden verse después introducidos en lenguajes posteriores como *Java* o *C#*. De hecho, Bertrand Meyer es considerado como uno de los padres de la programación orientada a objetos y su libro “*Construcción de Software Orientado a Objetos*” (Meyer, 1998) como uno de los mejores textos dentro de este campo.

Bjarne Stroustrup²⁷ empezó a trabajar en el antecesor de *C++* en 1979 en una primera versión que se denominaba “*C with Classes*”, que ya renombrará como *C++* en 1983 publicando la primera versión de sus trabajos en 1985 bajo el nombre de “*The C++ Programming Language*” que ampliará en una segunda edición en 1991 aprovechando el lanzamiento de la segunda versión del programa (*C++ 2.0*) que apareció en 1989. La última versión oficial de este lenguaje es la *C++14*²⁸.

El lenguaje *C++* surge dentro de los trabajos para la redacción de su tesis doctoral de Bjarne Stroustrup quien trataba de extender el lenguaje *C* (lenguaje de propósito general que en ese momento estaba muy extendido y era rápido y fácilmente portable) a la programación orientada a objetos. De este modo este autor toma características de este primer lenguaje y del propio *SIMULA*, tratando a su vez de superar los problemas de este último que se comportaba de una

²⁴ *B* es el nombre de un lenguaje de programación desarrollado en los Laboratorios Bell en un proyecto liderado por Kenneth L. Thompson con contribuciones de Dennis M. Ritchie publicado por primera vez en el año 1969 y que corresponde a una simplificación del lenguaje *BCPL*.

²⁵ *BCPL* es el acrónimo de “*Basic Combined Programming Language*” (Lenguaje de Programación Básico Combinado) que fue diseñado por Martin Richards de la Universidad de Cambridge (Reino Unido) en 1966 debido a las dificultades experimentadas con el lenguaje de programación *CPL* durante los años 60.

²⁶ *CPL* es el acrónimo del inglés “*Combined Programming Language*”. Fue un lenguaje de programación desarrollado conjuntamente entre el Laboratorio de Matemática en la Universidad de Cambridge (reino Unido) y la Unidad Computación de la Universidad de Londres (Reino Unido) durante la década de 1960. El esfuerzo colaborativo entre estas dos instituciones fue el responsable de la denominación de “combinado” en el nombre del lenguaje (anteriormente se llamaba simplemente Cambridge Programming Language). En 1963 estaba siendo implementado en la computadora Titan, en Cambridge (Reino Unido), y en la computadora Atlas, en Londres. Dicho lenguaje estuvo fuertemente influenciado por *ALGOL 60*.

²⁷ Autor danés nacido en 1930 e investigador destacado en ciencias de la computación y catedrático de esta disciplina en la Universidad de Texas, Estados Unidos

²⁸ En 2017 se ha lanzado una nueva versión de este lenguaje que informalmente se conoce como *C++17* y cuya especificación fue aprobada por el comité de estandarización de *C++* (WG21) de la Organización Internacional de Normalización (ISO) el 6 de septiembre de 2017 pero que a la fecha de redacción de este capítulo está pendiente de la publicación oficial definitiva por parte de ISO

manera muy lenta para aplicaciones prácticas concretas. Al contar tanto con características de C como de SIMULA muchos describen a C++ como un sistema híbrido (Wikipedia C++, 2017).

Tal y como se observa en Stroustrup (2010, 2013 y 2014), la evolución del lenguaje C++ ha sido quizás mayor que otros en lo que respecta a la programación orientada a objetos. Esto es así porque sucesivas versiones del lenguaje introducen conceptos propios de la programación genérica y programación estructurada (de las que se hablará un poco más adelante en esta tesis doctoral).

Por cerrar este recorrido por los sistemas más reconocidos, se debería citar al lenguaje de programación *Java*, sistema cuya evolución es muy bien descrita en Oracle (2016) aprovechando los 20 años del lanzamiento de este producto y cuya autoría se atribuye a James Gosling (Alberta, Canadá, 1951) de la empresa *Sun Microsystems*.

Efectivamente, si bien el lanzamiento de este sistema se establece en 1995, los trabajos iniciales de *Java* se remontan a 1991 dentro del denominado “*the Green Project*”. Dicho proyecto es puesto en marcha por la empresa anteriormente citada (*Sun Microsystems*). Esta compañía trataba de aplicar políticas respetuosas con el medio ambiente en el campo específico de componente electrónicos. En el marco de este proyecto Patrick Naughton y Jonathan Payne crearon el que se denominó entonces “*Oak programming language*” (le dan este nombre por el roble que se encontraba en los jardines de las oficinas de la empresa) para escribir *WebRunner* mas tarde conocido como *HotJava*.

Conforme se puede observar en Oracle (2016) el desarrollo de este producto ha sido muy rápida. Tras la presentación en 1995, surge una primera versión conocida como *JDK 1.0* (23 de enero de 1996), seguido del *JDK 1.1* (19 de febrero de 1997), *J2SE 1.2* (8 de diciembre de 1998), *J2SE 1.3* (8 de mayo de 2000), *J2SE 1.4* (6 de febrero de 2002), *J2SE 5.0* (30 de septiembre de 2004), *Java SE 6* (11 de diciembre de 2006), *Java SE 7* (julio de 2011), *Java SE 8* (marzo de 2014) y, finalmente, *Java SE9* (22 de septiembre de 2017) última versión estable conocida a la fecha de redacción de la presente tesis.

Conforme se destaca en Wikipedia – Java (2016), este es un “*lenguaje de programación de propósito general, concurrente, orientado a objetos que fue diseñado específicamente para tener tan pocas dependencias de implementación como fuera posible. Su intención es permitir que los desarrolladores de aplicaciones escriban el programa una vez y lo ejecuten en cualquier dispositivo (conocido en inglés como WORA, o "write once, run anywhere"), lo que quiere decir que el código que es ejecutado en una plataforma no tiene que ser recompilado para correr en otra...*”, su “*sintaxis está en gran medida basada en los conceptos de C y C++*” pero, “*con un menor número de utilidades de bajo nivel*”.

La influencia de Java ha sido determinante siendo en la actualidad seguramente el principal sistema utilizado en aplicaciones de cliente-servidor de web y habiendo sabido sus desarrolladores anticipar la importancia que tendría Internet con el transcurso de los años.

No son, sin embargo, los arriba indicados los únicos sistemas de programación orientada a objetos pudiendo citar entre otros (por orden alfabético que no por grado de difusión o influencia) los siguientes: ABAP, ABL, ActionScript, ActionScript 3, Ada, Clarion, Clipper, D, DRP, Fortran 90/95, Gambas, GObject, Genie, Harbour, Lexico, Magik (SmallWorld), Objective-C, Ocaml, Oz, Object Pascal (Embarcadero Delphi), Pauscal (no confundir con Pascal), Perl, PHP, PowerBuilder, Python, R, Ruby, Self, Scala, Vala, VB.NET, Visual FoxPro, Visual Basic 6.0, Visual DataFlex, y Visual Objects o XBase++.

1.2.6 Simulación basada en FORTRAN: SIMSCRIPT, GASP, SLAM y SIMAN.

Tres investigadores han sido fundamentales en el desarrollo de lenguajes y paquetes de simulación en los últimos 25 años habiendo centrado sus trabajos bajo el soporte del lenguaje de programación de propósito general *FORTRAN*. Estos son Laureate Harry Markowitz²⁹, Philip J. Kiviat³⁰ y Alan Pritsker^{31, 32} autores que en algún momento de su carrera han trabajado en estrecha colaboración y en otra compitiendo en un mismo mercado bajo distintos desarrollos y marcas comerciales.

²⁹ Al margen de los trabajos en el campo de la simulación, L.H. Markowitz, investigador de la Universidad de Chicago (Estados Unidos) destaca por haber sido galardonado con el premio Nobel en ciencias económicas en el año 1990 (junto con Merton H. Miller y William F. Sharpe) por sus trabajos en relación a finanzas empresariales y gestión de carteras (teoría del portfolio de inversiones).

³⁰ El trabajo científico de P.J. Kiviat durante casi 50 años (1962-2010) y sus contribuciones al desarrollo de los sistemas SIMSCRIPT y GASP es recopilado de manera exhaustiva en Wilson (2011) pudiendo además encontrar unas notas biográficas muy interesantes en una entrevista recogida en Page y Tufarolo (1997) en las que P.J.Kiviat abordando de una manera muy amena las relaciones entre todos los investigadores que venían desarrollando casi simultáneamente diferentes simuladores en la década de los 60 y 70 (escuela Noruega (Simula), RAND Corporation (SIMSCRIPT) e IBM (GPSS)).

³¹ Wilson y Goldsman (2001) repasan de una manera detallada las contribuciones de A. Pritsker en un artículo dedicado monográficamente a su vida profesional, científica y académica.

³² A. Pritsker es sin duda uno de los investigadores más influyentes en el campo de la simulación y se considera padre de un gran conjunto de lenguajes y paquetes de simulación y de los anteriores quizás el que ha dejado un mayor bagaje bibliográfico en este campo. Wilson y Goldsman (2001) en un artículo biográfico sobre A. Pritsker citan un buen número de referencias de dicho autor que se han ampliado en el marco del presente trabajo utilizando el texto de revisión bibliográfica del propio Pritsker que (Pritsker, 1990). Dentro de los trabajos más destacados en el campo de la simulación se pueden destacar (agrupados por sistemas) los siguientes: lenguaje de simulación GASP II: Pritsker y Kiviat (1969); sistema para análisis de redes GERT: Pritsker (1974b); lenguaje de simulación GASP IV: Hurst y Pritsker (1973), Pritsker y Hurst (1973) y Pritsker (1974a); lenguaje de simulación SAINT: Pritsker *et al.* (1974); lenguaje de simulación GASP_PL/I: Pritsker y Young (1975); lenguaje de simulación Q-GERT: Pritsker (1977) y Pritsker (1979); lenguajes de simulación SLAM; SLAM II; y SLAM II/PC: Pritsker y Pegden (1979); Pritsker (1984); Pritsker (1986); Pritsker *et al.* (1986b) y Pritsker *et al.* (1989); entorno de simulación TESS: Standridge y Pritsker (1987); entorno de simulación SLAMSYSTEM: Pritsker Corporation (1989); entorno de simulación para el campo de la manufactura - FACTOR/AIM: Pritsker *et al.* (1986a) y Lilegdon *et al.* (1994); lenguaje de simulación Visual SLAM y entorno de simulación AweSIM: Pritsker *et al.* (1997) y Pritsker y O'Reilly (1999).

Comenzando con la descripción de sus contribuciones se debería iniciar el recorrido en orden cronológico en L.H. Markowitz.

Poco más tarde del lanzamiento de SIMULA³³ este autor impulso el desarrollo de *SIMSCRIPT*, otra tecnología basada en *FORTRAN* alternativa al *GPSS*³⁴ que se han descrito en el apartado 1.2.4, más enfocada a usuarios que no tenían porqué ser obligatoriamente expertos informáticos.

El objetivo de este desarrollo según palabras del propio Markowitz era “*reducir el tiempo de programación permitiendo al programador definir el sistema a ser simulado (de una manera estandarizada) en vez de describir las acciones que el computador debía adoptar para llevar a cabo la simulación*”³⁵.

En Markowitz *et al.* (1962) se presenta el lenguaje de simulación *SIMSCRIPT* que fue desarrollado por *RAND Corporation* en un proyecto financiado por las fuerzas áreas de Estados Unidos. Este proyecto fue dirigido por el propio L.H. Markowitz siendo el programador principal de su primer compilador B. Hausner y el autor de su primer manual H.W. Karr (ambos coautores de la referencia anterior) tal y como reconoce el propio Markowitz en su nota autobiográfica disponible en la página web de la organización de los Premios Nobel (Markowitz, 1990).

Según sus creadores, *SIMSCRIPT* tenía como predecesores el *SPS-1* (“*Simulation Programming System*”) desarrollado también en *RAND Corporation* por Richard Conway que a su vez había sido resultado de la evolución de un sistema que se llamaba *GESM* (“*General Electric Manufacturing Simulator*”) que el propio L.H. Markowitz había desarrollado para *General Electric Manufacturing Services*.

SIMSCRIPT desde hace años viene desarrollándose y comercializándose por la empresa *CACI*³⁶ *Advanced Simulation Laboratory* (hoy *CACI International Inc.*), fundada por el propio L.H. Markowitz y H. Karr en 1962, año en el que el lenguaje dio sus primeros pasos³⁷.

Tal y como se puede encontrar en CACI (2011a) en un trabajo que describe la historia de este sistema, tras este primer lanzamiento de principios de los años 60, se encontrarían los siguientes

³³ Mientras que el lanzamiento de SIMULA se establece en 1962 el de SIMSCRIPT data de 1963 aunque sus creadores ya lo presentan al público en Markowitz *et al.* (1962).

³⁴ Referencias al sistema GPSS se encuentran en Greenberg (1972), Schriber (1974), Gordon (1975), Bobillier *et al.* (1976), Henriksen (1976), O'Donovan (1976), Henriksen (1985), Cox (1991) Ståhl (1992), Henriksen (1993), Schriber (1995), Banks *et al.* (1995), Crain (1997), Ulrich *et al.* (1998), Crain y Henriksen (1999), Herper y Ståhl (1999), Schriber *et al.* (2001), Ståhl (2001), Born y Ståhl (2004), Fonseca i Casas y Casanovas (2009), Minuteman Software (2010), Ståhl *et al.* (2011), Villareal *et al.* (2012), Villareal (2013), Wolverine Software Corporation (s/f).

³⁵ Texto traducido por el autor de esta tesis de la referencia Markowitz (1990).

³⁶ CACI es el acrónimo de *Consolidated Analysis Centres Inc.*

³⁷ SIMSCRIPT (2016) y Markowitz (1990).

evolutivos: SIMSCRIPT II (1966)³⁸, el aún más extendido SIMSCRIPT II-5 (1973)³⁹ y más tarde el SIMSCRIPT III (2003)^{40, 41} con una versión actualizada bajo este mismo nombre en el año 2007 (última evolución reportada)⁴².

En estas últimas versiones ya se combinan la modularidad (característica de los primeros desarrollos) con las técnicas de programación orientada a objetos, siendo en estos momentos el único lenguaje de simulación que permite un entorno híbrido de simulación modular basado en agentes y que según CACI (2011b) constituye un entorno ideal para construir modelos de simulación en DSS's ("*Decision Support Systems*") y que cuenta con aplicaciones prácticas concretas en diversos campos entre los que cabe citar el de transportes que es objeto de esta tesis.

SIMSCRIPT III permite construir modelos capaces de correr tanto en plataforma de PC Windows como UNIX workstations y en plataformas de 32-bit y 64-bit de PC Linux. Esta aplicación cuenta además con una potente base de datos que permite almacenar y retomar diferentes escenarios de simulación.

Como se observa en la secuencia anterior se abrió un largo periodo de reflexión entre la aparición de la versión II-5 y la versión III (30 años entre 1973 y 2003), reflexión que es recogida en Markowitz (1979), donde este autor analiza el presente y futuro de este sistema y que pasaba por el desarrollo en paralelo de otros sistemas aún más "accesibles" para el público en general o para programadores con menores medios disponibles.

En el desarrollo de *SIMSCRIPT* contribuyó de una manera muy relevante P.J. Kiviat quien había trabajado previamente en el modelo *GASP* ("*General Activity Simulation Program*"), también un lenguaje de simulación bajo *FORTTRAN* que en versiones posteriores fue evolucionado por A. Pritsker y que formalmente vio su luz en 1962 y presentado en Kiviat y Colker (1964).

En estas etapas iniciales *GASP* trataba de ser una simplificación aún mayor que *SIMSCRIPT*. Así se puede leer en la propia presentación del programa realizada por RAND Corporation que "*GASP no puede competir con SIMSCRIPT pero sirve a aquellos que tienen una pequeña unidad o que usan varios computadores sin un lenguaje común*".

³⁸ La filosofía y líneas generales del sistema es presentado inicialmente en Kiviat (1966) y más tarde y con mayor detalle en Kiviat (1968), Kiviat *et al.* (1968) y Wyman (1970). El primer manual de usuario es el incluido en Kiviat y Villanueva (1968)

³⁹ Véase Kiviat *et al.* (1973), Law y Karney (1984), CACI (1988), Russell (1989), Averill y Larmey (2002), y Vignaux (2002).

⁴⁰ Véase Rice *et al.* (2005), CACI (2007) y CACI (2011b).

⁴¹ Actualmente, a fecha de redacción de la presente tesis, este sistema se encuentre versión 3.0 de SIMSCRIPT III.

⁴² Se puede encontrar el manual de usuario de esta última versión en CACI (2007).

En este punto parecía claro que los desarrolladores estaban buscando la extensión de los sistemas de simulación a un público más general anticipando el futuro desarrollo comercial de estas técnicas y su implantación a mayor escala en aplicaciones prácticas más diversificadas.

Tras la primera versión de *GASP* surgió un primer evolutivo conocido como *GASP-II* y presentado en Pritsker y Kiviat (1969) y al que siguió *GASP-IV* (1973) versión que se encuentra referenciada en Pritsker y Hurst (1973) y Pritsker (1974a) de una manera teórica y en Hurst y Pritsker (1973) de una manera práctica en una aplicación en la industria química. En estas versiones colaboró con A. Pritsker y P.J. Kiviat otro relevante autor, C. Demis Pegden, al que se referenciará posteriormente.

Más tarde en Pritsker y Young (1975) se presentaría una variante conocida como *GASP PL/I* y en Cellier y Blitz (1976) se referenciaba una nueva evolución conocida como *GASP-V*.

Al tiempo que Markowitz (1979) repasaba el estado actual y perspectivas futuras del *SIMSCRIPT*; Pritsker (1979) presentaba un trabajo en relación al *GASP* donde también se analizaba el grado de desarrollo y posibles evoluciones posteriores de este software. Finalmente, ambos proyectos fueron parcialmente aparcados para centrarse en la evolución de ciertas variantes que han tenido bastante difusión. La primera bajo el nombre de *SLAM*⁴³, la segunda bajo la referencia de *SIMAN*⁴⁴ y por último *JOSS*⁴⁵, otro lenguaje de cierta influencia.

La primera versión de *SLAM* (*Simulation Language for Alternatives Modeling*) fue desarrollada en 1979 por C.D. Pegden y A. Pritsker y distribuida por *Pritsker Corporation* (Pritsker y Pegden, 1979). La segunda evolución *SLAM-II* fue lanzada en 1984 habiendo sido presentada en Pritsker (1984) y desarrollado en un texto más completo en Pritsker (1986) y Pritsker *et al.* (1986b), y actualizados en Pritsker *et al.* (1989). Este desarrollo llegaría hasta este punto en cuanto a sus evolutivos pues sus autores pronto se embarcarían en otros proyectos que se verán a continuación.

No obstante, el lenguaje sigue siendo difundido comercialmente encontrando referencias bajo el nombre de *SLAMSYSTEM* en Pritsker Corporation (1989) o *VISUAL SLAM* en Pritsker *et al.* (1997) y Pritsker y O'Reilly (1999); en estos últimos casos asociados ya al nombre comercial de *AweSIM*.

Por su parte, la versión original del *SIMAN* (*SIMulation and ANalysis*) fue desarrollada por C.D. Pegden en la Universidad de Alabama (Estados Unidos), cuando era líder del grupo de desarrollo

⁴³ Pegden y Pritsker (1979).

⁴⁴ Pegden (1982).

⁴⁵ Tal y como viene reflejado en Wikipedia – JOSS (2013), el sistema *JOSS* (acrónimo de *JOHNNIAC Open Shop System*) fue uno de los primeros lenguajes de programación de tiempo compartido (compartir recursos de computación entre muchos usuarios a través de multitareas). Su predecesor fue *ALGOL 58* y fue desarrollado por J. Clifford Shaw en la empresa *RAND Corporation* e implementado por primera vez en un formato beta, en el ordenador *JOHNNIAC* en mayo de 1963 con implantación completa en 1964 sobre 5 terminales y en 1965 soportando 10 terminales (*JOSS in*).

de la versión original de *SLAM*. Más tarde, C.D. Pegden realizó su trabajo en el *Pennsylvania State University* (Pensilvania, Estados Unidos) y desde su implementación inicial en 1984, ha sido continuamente refinada por *System Modelling Corporation* presentándose trabajos en *SIMAN* en Pegden (1990) y Pegden *et al.* (1995).

Finalmente, esta compañía es adquirida por *Rockwell Automation* en el año 2000, empresa licenciataria y desarrolladora del paquete de simulación *ARENA* basado en el propio *SIMAN* tal y como se desprende de Pegden y Davis (1992). Hoy en día, *ARENA* es el simulador con mayor número de licencias a nivel mundial.

Los trabajos de C.D. Pegden en el desarrollo de simuladores continuaría y fruto de trabajos anteriores y de innovaciones introducidas con posterioridad desarrollaría otro paquete comercial bajo el nombre de *SIMIO* que presentaría en Pegden (2007) en una conferencia en el Winter Simulation Conference celebrado en el año 2007 y que ha seguido evolucionado en la actualidad (Pegden, 2013).

A su vez la influencia de A. Pritsker no se limita a los sistemas anteriormente analizados habiendo contribuido al desarrollo de otros múltiples entornos de simulación quizás con menos trascendencia, pero también reseñables como *SAINT*⁴⁶ y *GERTE / Q-GERT*⁴⁷, ambos centrados en el análisis de redes, *FACTOR/AIM*⁴⁸ un entorno de simulación de propósito específico concebido para procesos en fábricas y *TESS* definido por los autores como un “*entorno extendido de ayuda a la simulación*”⁴⁹.

Al margen de *ARENA* o *SIMIO* que bebieron de las fuentes de *SIMAN*, otros paquetes comerciales de simulación o simuladores muy extendidos en la actualidad (y de los que se hablará con más profundidad con posterioridad) han sido evoluciones de estos primeros productos. Así se puede citar a *EXTEND* (que vio la luz en 1987) y *AweSIM* (lanzado en 1996)⁵⁰ que siguieron los pasos de *SLAM-II* y de *MODSIM*⁵¹ también desarrollado en CACI y que se basó en los pasos andados por *SIMSCRIPT*.

⁴⁶ Pritsker *et al.* (1974).

⁴⁷ Pritsker *et al.* (1974a) y Pritsker (1977).

⁴⁸ Pritsker *et al.* (1986b) y Lilegdon *et al.* (1994).

⁴⁹ Standridge y Pritsker (1987).

⁵⁰ Véase Pritsker y O'Reilly (1996) y Pritsker *et al.* (1997) en el que los autores presentan una variante de *SLAM* que denominan *Visual SLAM* y que asocian al nuevo software que denominan *AweSIM* y que vuelve a ser presentado dos años más tarde en la Winter Simulation Conference del año 1999 en O'Reilly y Lilegdon (1999) que acompañaría temporalmente a un texto muy completo sobre su funcionamiento en Pritsker y O'Reilly (1999).

⁵¹ Bryan (1989), Balanger (1990), Balanger y Mullarney A. (1990), Balanger *et al.* (1990), Rusell (1991), CACI (1996), Mullarney (1996), Globe (1997), Karakaneva (1999), Marti (1999), Wood y Tumay (1999), Drucker y Campbell (2015).

1.2.7 El Winter Simulation Conference y el periodo de expansión científica.

En 1967 se celebró el *Winter Simulation Conference* (en adelante WSC)⁵², congreso que viene celebrándose con carácter anual desde esa fecha y donde se presentan todos los avances en técnicas, lenguajes o software de simulación y sus aplicaciones derivadas. Hoy en día es considerado el centro de excelencia y referente en lo que al campo de los sistemas de simulación se refiere y cuenta con un fondo documental de extremado valor para investigadores de este campo que ha ayudado a difundir los resultados y propiciar su avance científico. Una breve historia del WSC puede ser consultada en la página web de la organización en WSC (2014).

El periodo de gran expansión científica y práctica de los modelos de simulación, ayudado por el WSC, se da en la década de los 70 y 80 en paralelo al progreso de las técnicas de generación, optimización y representación de datos.

Con estas técnicas se mejora notablemente la difusión de resultados que pasan a presentarse en forma de gráficos o incluso imágenes en movimiento ó animaciones; en vez de en forma de tablas o matrices, salidas matemáticas de los modelos al uso en la época (que suelen resolverse mediante técnicas matriciales).

Otro nuevo gran salto se produce en los años 2000, con la aparición de gran número de diferentes paquetes comerciales y simuladores que acercan de una manera “amigable” la simulación a un conjunto mucho más amplio de usuarios (ya no necesariamente expertos en programación) y aplicaciones prácticas (lanzamiento de paquetes de propósito específico para gran número de sectores en mucho de los campos de actividad económica).

Se dedicará un epígrafe específico a estos simuladores en este capítulo (apartado 1.3.3.4) mientras que aquellos simuladores con aplicación específica en el campo portuario serán tratados posteriormente en el siguiente capítulo en esta tesis.

Ingolf Ståh, hoy profesor emérito en la *Stockholm School of Economics*, en una intervención en la WSC del año 2003, recogida en Schriber *et al.* (2003) presenta un interesante resumen de textos disponibles relativos a simulación escritos con anterioridad a 1980 que proporciona una buena recopilación histórica en el marco de este trabajo.

Por cerrar este capítulo introductorio y para poder profundizar en cada uno de los lenguajes y programas de simulación desde sus orígenes, en la tabla 1 se resumen las referencias bibliográficas citadas por estos autores, que se han completado para esta tesis con algunas

⁵² La primera edición del WSC (1967) se tituló “*The Conference on Applications of Simulation Using the General Purpose Simulation System (GPSS)*” lo que denota la importancia que tuvo en sus orígenes este primer lenguaje.

propuestas adicionales y que contribuyen a ampliar el excelente trabajo con nuevas y más actuales referencias.

Tabla 1. Referencias bibliográficas en el ámbito de la simulación.

SISTEMA	AUTOR
FORTTRAN	Naylor (1969) Martin (1968) Meier <i>et al.</i> (1969) Emshoff y Sisson (1970) Schmidt y Taylor (1970) Maisel y Gnugoli (1972) McMillan <i>et al.</i> (1973) Shannon (1975) Fishman (1978) Narsingh (1979)
GPSS	Gordon (1960, 1969, 1975 y 1978) Reitman (1971) Greenberg (1972) Schriber (1974) O'Donovan (1976) Bobillier <i>et al.</i> (1976)
GASP-SLAM-AweSIM	Pritsker y Kiviat (1969) Hurst y Pritsker (1973) Pritsker y Hurst (1973) Pritsker (1974a, 1977, 1979 y 1984) Pritsker y Young (1975) Pegden y Pegden (1979) Pritsker y Pegden (1979) Pritsker <i>et al.</i> (1986b, 1989 y 1997) Pritsker Corporation (1989) Pritsker y O'Reilly (1996 y 1999)
SIMSCRIPT	Markowitz <i>et al.</i> (1962) Kiviat <i>et al.</i> (1968 y 1973) Wyman (1970) Markowitz (1979) Law y Larmeu (1984) CACI (1988, 2011a y 2011b) Rusell (1989 y 1991) Bryan (1989) Vignaux (2002) Averill y Larmey (2002) Rice <i>et al.</i> (2005)
MODSIM	Bryan (1989) Balanger (1990) Balanger y Mullarney (1990) Balanger <i>et al.</i> (1990) Rusell (1991) CACI (1996) Mullarney (1996) Globe (1997) Karakaneva (1999) Marti (1999) Wood y Tumay (1999)
SIMULA	Birtwistle <i>et al.</i> (1973) Birtwistle (1979) Franta (1977) Pooley (1987) Kirkerud (1989) Holmevik (1994)
GPS (General Simulation Program)	Tocher (1962)

SISTEMA	AUTOR
Hokus	Poole y Szymankewicz. (1977)
Pseudocodigos	Lewis y Smith (1979)
Teoría de Simulación y Textos genéricos sobre simulación sin referirse a ningún lenguaje específicamente	Tocher (1960 y 1962) Chorafas (1965) Mize y Cox (1968) Fishman (1973) Zeigler (1976) Fishman (1978) Zeigler <i>et al.</i> (2000) Law (2014)
Estadística y Experimentación mediante Simulación	Naylor <i>et al.</i> (1966) Kleinen (1974) (vol 1) y (1975) (vol 2)
Simulación Continua y Sistemas Dinámicos	Forrester (1961, 1969, 1970, 1971, 1975 y 1996) Meadows <i>et al.</i> (1972) Korn y Wait (1978) Meadows y Randers (1992)
Simulación aplicada a ciencias sociales / comportamiento humano	Bonini (1963) Dutton y Starbuck (1971a y 1971b) Guetzkow <i>et al.</i> (1972) Frazer (1975) Starbuck (1983)

Fuente: Origen en Schriber *et al.* (2003) y completada con elaboración propia.

1.3 Estado actual del arte: herramientas y clasificación.

1.3.1 Clasificación funcional de modelos: Deterministas versus Estocásticos, Estáticos versus Dinámicos, Discretos versus Continuos.

Hasta ahora se ha presentado una breve historia de la simulación. Sin embargo, no se ha entrado a determinar, siquiera de una manera sencilla, qué clase de modelos se pueden construir como base para discriminar cuales son los que más ajustan a las necesidades portuarias (objetivo último de esta tesis) o, mejor dicho, para cada una de las necesidades específicas que en gestión portuaria se pueden presentar ya que, de acuerdo al tipo de problema que se desee resolver, uno u otra técnica o modelo estarán mejor prescritos.

Inicialmente, de manera resumida se podría señalar que en el campo de modelización se distingue habitualmente entre:

- Modelos deterministas versus modelos estocásticos:
 - Modelos deterministas: Aquellos en el que todas las variables que configuran el proceso son valores fijos.

- Modelos estocásticos: Aquellos en los que al menos una de estas variables se representa a través de una función probabilística.
- Modelos estáticos versus modelos dinámicos:
 - Modelos estáticos. Aquellos en los que la evolución del modelo es independiente de la variable tiempo. El estado del sistema varía en función de cómo lo hacen ciertos eventos, agentes, objetos o entidades; pero éstos no necesariamente cambian o evolucionan como respuesta a una secuencia temporal determinada.
 - Modelos dinámicos: Modelos en los que en el proceso de modelización se considera el tiempo, de tal modo que la evolución del sistema y el estado en que éste se encuentra tienen relación directa con el tiempo.
- Modelos de eventos discretos versus simulación continua:
 - Simulación mediante eventos discretos: El sistema cambia de una manera instantánea en respuesta a un evento determinado y el estado de cambios en el modelo sólo se da cuando se produce determinado evento. En la literatura científica se suele denominar a estos modelos bajo el acrónimo “DES”, del inglés *Discrete Event Simulation*, acrónimo que se utilizará a partir de ahora en este trabajo.
 - Simulación continua: Los cambios en el sistema se cuantifican de manera continua en respuesta a los cambios en los elementos de control.
 - Simulación híbrida: Existen unos modelos híbridos entre continuos y de eventos discretos, denominados en la literatura científica “*Discrete rate*” y que combinan ciertos aspectos de ambos de tal manera que la simulación al igual que se hace en el caso continuo, simula un flujo más que determinados eventos pero el sistema es capaz de recalcular, valores y ratios del evento independientemente de cuándo ocurra dicho evento (no hay que esperar a que ocurra para conocer su estado)

Así, por ejemplo, un modelo que evaluara el proceso de llegada de buques a un puerto y se reprodujese la secuencia de atraque, operación y despacho del mismo, sería probablemente un modelo estocástico, estático y bajo un enfoque discreto. Efectivamente, se puede reproducir la realidad mediante un modelo de colas bajo cierta distribución de ley de llegadas y de servicio (modelo estocástico), donde las bases de avance del modelo serían mediante una secuenciación de eventos discretos (operación de llegada – espera para atraque – atraque – espera a medios de operación - operación – espera a medios de desatraque – desatraque) que van determinando un cambio instantáneo del sistema cuando uno de esos procesos se da por concluido (sin necesidad de hacer correr el modelo en relación a la variable tiempo). Es decir, ante una determinada llegada

de un buque al sistema, éste cambia instantáneamente, pero hasta que no se produce una nueva entrada o salida del sistema, éste no cambia.

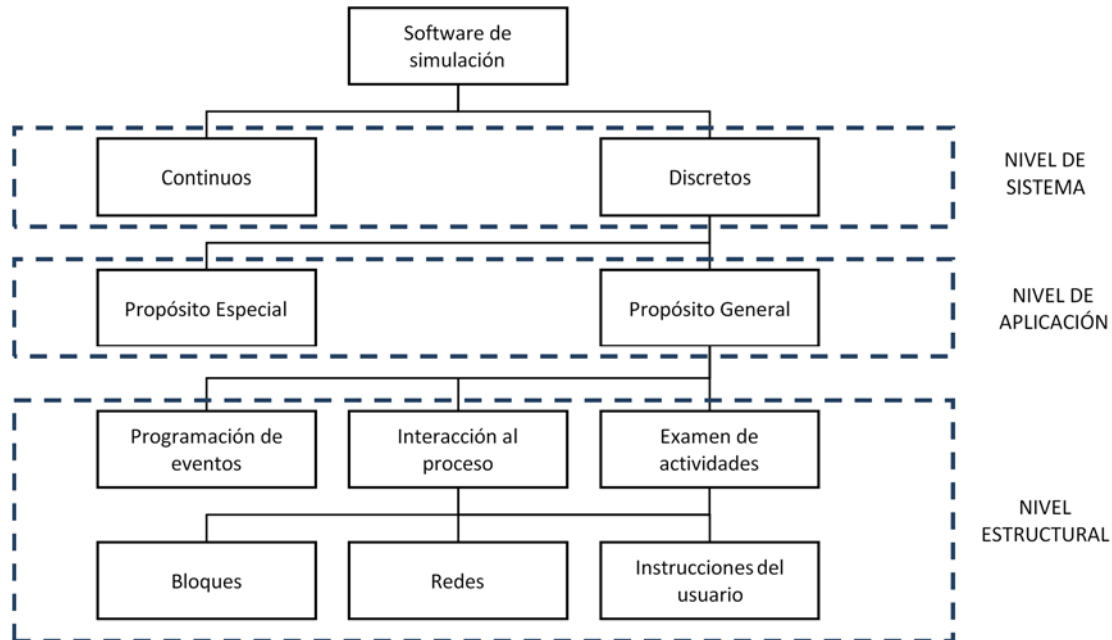
Otro ejemplo podría ser un modelo de simulación de maniobra o un modelo de simulación de clima marítimo en el que los cambios en estos sistemas se van haciendo bajo un enfoque continuo y dinámico.

Con el peligro de generalizar, ya se ha avanzado que lo habitual, pero no lo único, es que los modelos de simulación portuaria aplicados a planificación sean de tipo estocásticos y abordados desde la técnica DES; si bien esto depende de la complejidad de la realidad que se quiera modelar y los respectivos requerimientos computacionales en uno y otros casos existiendo notables excepciones a esta regla general, siendo cada vez más los modelos que se abordan desde la perspectiva de Sistemas Dinámicos (SD), o de simulación orientada a agentes o ABS (del acrónimo inglés *Agent Based Simulation*) del que también se hablará en un punto posterior cuando se discutan los diferentes paradigmas de simulación (véase epígrafe 1.3.2.).

Raffo (1999) presenta un interesante resumen gráfico de clasificación del software de simulación, que, en un primer nivel de sistema, clasifica entre continuos y discretos, pero a nivel de aplicación distingue entre los de propósito general y propósito especial:

- Propósito general: Aquellos que sirven a cualquier campo y no son especialmente diseñados para una aplicación concreta, siendo desarrollados con una vocación generalista.
- Propósito especial: Aquellos que representan simplificaciones o particularizaciones concretas para un campo específico que permiten “personalizar” un modelo a un campo específico o incluso que se desarrollan “*ad hoc*” para resolver un caso concreto.

Ilustración 6. Clasificación del software de simulación.



Fuente: Raffo (1999).

Como se puede observar en la ilustración 6, dentro de los lenguajes de programación de propósito general existirían, tres posibilidades en cuanto a lo que se refiere a la estructura del sistema: programación de eventos, interacción al proceso y examen de actividades.

- En la programación de eventos, el programador identifica los mismos dándoles unas características y mediante las adecuadas rutinas de cálculo viendo cómo cambian dichos eventos en el transcurso del tiempo.
- En una programación por procesos se detalla una secuencia de tiempos interrelacionados en los que según va avanzando el tiempo se producen cambios en los eventos (es decir se pueden analizar procesos globales en los que a su vez concurren varios eventos). Este autor determina que los modelos con interacción al proceso pueden subdividirse según otro sub-nivel estructural en bloques, redes o instrucciones del usuario.
- En la simulación por examen de actividades, el programador define las condiciones al inicio y final de cada actividad descrita y en cada iteración o incremento de tiempo determina si el conjunto de actividades ha podido empezar o terminar.

1.3.2 Clasificación de modelos conforme el paradigma de simulación: DES, ABS y SD.

Según Kayame *et al.* (2014), referenciando a Stone (1972) y Knuth (1980) un paradigma de programación podría definirse como “*un conjunto de reglas que definen con precisión una secuencia de operaciones de tal modo que cada una de estas reglas es efectiva y definitiva y la secuencia finaliza en un periodo de tiempo finito*”⁵³.

De una manera más coloquial se puede decir que el paradigma de programación es el estilo o la forma con que se construyen las estructuras y diferentes elementos de los lenguajes de programación.

Si bien existen diferentes clasificaciones de paradigmas que más adelante se citarán pero que tienen un carácter más académico en el campo de las ciencias de computación y programación y menor aplicación en el contexto de esta tesis, hoy en día se puede decir que, en el campo portuario y de una manera más global en el campo de la cadena de suministro⁵⁴, tres son los grandes paradigmas de simulación aceptados por la comunidad científica. Efectivamente, el mundo científico viene clasificando los modelos en tres grandes categorías:

- Simulación mediante eventos discretos, o “DES” del acrónimo *Discrete-Event Simulation*,
- Simulación basada en agentes, o “ABS”, del acrónimo *Agent-Based Simulation*.
- Simulación mediante sistemas dinámicos, o “SD”, de *System Dynamics*.

En las técnicas DES⁵⁵, los modelos se construyen basándose en:

- Entidades (“Entities”): Nombre general de los objetos que se mueven o conforman el sistema.
- Eventos (“Events”): Procesos a través de los cuales pasan las entidades durante la simulación.
- Recursos (“Resources”): Objetos necesarios para desencadenar los eventos.

A su vez, los modelos ABS⁵⁶, se basan:

⁵³ Traducción realizada por el autor de esta tesis refiriéndose al texto original de Kayame *et al.* (2014).

⁵⁴ Véase por citar un ejemplo la clasificación proporcionada para el campo de la cadena de suministro por Behdani (2012).

⁵⁵ Más información sobre los modelos DES se puede encontrar en Banks *et al.* (2009).

⁵⁶ Más información sobre los modelos ABS, incluyendo un inventario de las herramientas disponibles se puede encontrar en Allan (2010). De igual modo una introducción a estos sistemas y su diferenciación con respecto a los modelos DES se tratan en Allen (2011)

- Agentes (“Agents”): Entidades autónomas, capaces de auto-dirigirse moviéndose a través del sistema e interactuando con otros agentes con el fin de alcanzar un objetivo determinado y “*aprender de la experiencia*”.
- Reglas (“Rules”): Normas o criterios seguidos por los agentes para conseguir sus objetivos.

En los modelos ABS los agentes del sistema, que tienen sus propios objetivos, tienen un comportamiento “activo” dentro del mismo, mientras que en los sistemas DES el comportamiento de las entidades es determinado por el sistema de una manera “pasiva”. Siendo así, en los modelos DES las colas son un elemento esencial del sistema, mientras que dicho concepto de colas no es aplicable a los modelos ABS.

Por último, los modelos SD gravitan más en un diseño de redes (más que en sistemas de colas como lo hacen los DES), considerando como elementos esenciales en su programación:

- Stocks (“stocks”): Almacenamiento de objetos en el sistema.
- Flujos (“Flows”): Que definen el movimiento de los objetos entre los diferentes stocks que conforman el sistema.
- Retrasos (“Delays”): Retrasos entre la medición y las acciones a desarrollar tras dicha medición.

Continuando con las diferencias, mientras que los modelos DES o ABS son, por su propia naturaleza representaciones estocásticas de la realidad en el que se utilizan como “*inputs*” distribuciones estadísticas para modelizar un comportamiento aleatorio, los SD son, también por su propia naturaleza, modelos deterministas.

Más allá de una explicación metodológica de sus principios y sin necesidad de profundizar más en esta tesis en las bases computacionales y detalles técnicos de los mismos; estos tres sistemas presentan unas características propias que Borshchev y Filippov (2004) simplificaban de una manera muy comprensiva en un plano bidimensional en el que, por un lado, representaban el nivel de abstracción que requieren y, por otro lado, si los mismos se configuran mediante procesos discretos o continuos. Ambos, nivel de abstracción y continuidad, son los dos atributos principales que permiten diferenciarlos y encontrarles acomodo en una aplicación práctica concreta.

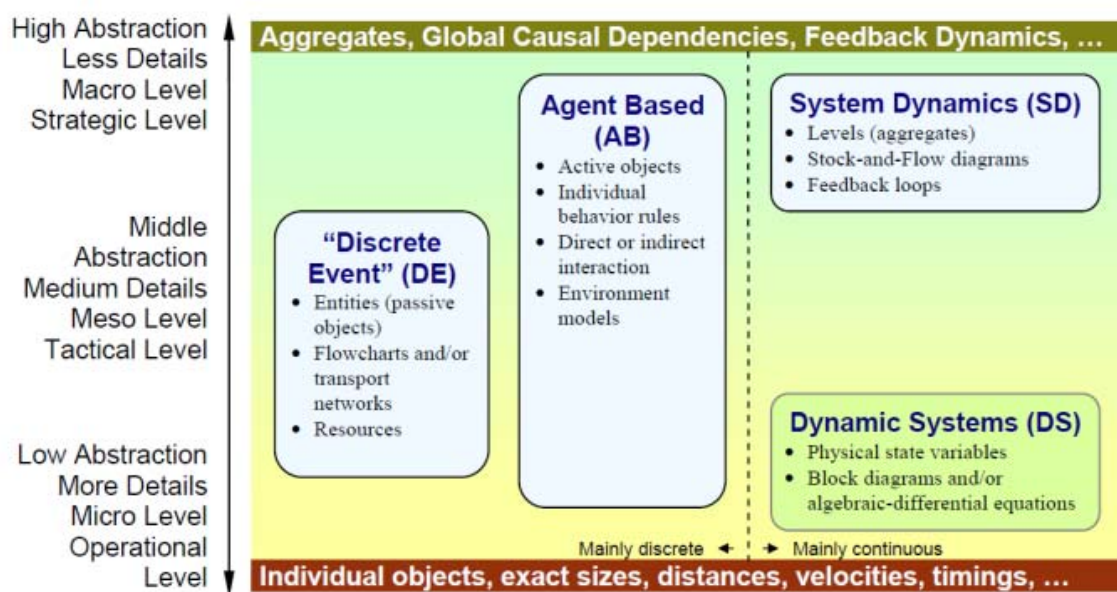
Así, como ya se ha comentado, los modelos DES o ABS son fundamentalmente discretos, mientras que los SD se desarrollan en un plano continuo. Por otro lado, los modelos DES son más aplicables en bajos niveles de abstracción, donde un mayor detalle es requerido respondiendo a un análisis mucho más “*micro*”. Con ello los modelos DES responden a la resolución de problemas operacionales o tácticos más que estratégicos y donde los elementos cuantitativos tienen una importancia significativa.

En contraste, los SD suelen encontrar un mejor campo de aplicación cuando se requiere alta abstracción, los resultados se evalúan desde una perspectiva “*macro*” y se despliegan a un nivel estratégico (*versus* operacional), encontrando un buen campo de aplicación cuando los resultados que se esperan del modelo, o más allá, los “*inputs*” con los que se alimentan los procesos son en algún caso de orden cualitativo.

Por su parte, los ABS son quizás los de más amplio espectro respondiendo adecuadamente tanto a altos como a bajos niveles de abstracción; abarcando según el caso decisiones tanto estratégicas como operacionales o tácticas.

Borshchev y Filippov (2004) compilan estos conceptos en el mapa de paradigmas de simulación que figura a en la ilustración 7.

Ilustración 7. Mapa de paradigmas en simulación conforme el nivel de Abstracción.



Fuente: Borshchev y Filippov (2004).

El nivel de abstracción que requieren las diferentes aproximaciones tiene una consecuencia práctica inmediata. Conforme las investigaciones de Tako y Robisson (2009-b; 2010), mientras que los investigadores que emplean DES utilizan más tiempo en los procesos de construcción, verificación y validación del modelo, los que utilizan técnicas SD emplean un mayor tiempo en la conceptualización del propio modelo (más que en la propia escritura de los códigos que lo forman) por el esfuerzo que les requiere un proceso de abstracción más complejo.

Tako y Robisson (2011) investigan las diferencias entre sistemas DES y SD en un contexto más específico y con analogías al campo portuario como es el de la logística y el diseño de cadenas de suministro. En este significativo trabajo analizan un total de 127 artículos y contabilizan la frecuencia con la que uno u otro paradigma son utilizados concluyendo que en este campo ha

predominado la utilización de las aproximaciones DES, excepción hecha de cuando se analiza el “efecto látigo”⁵⁷ donde los investigadores han preferido una aproximación al problema bajo SD.

Sea como fuere, es evidente que los tres paradigmas presentan solapes y áreas comunes de tal manera que una misma realidad puede en muchos casos abordarse desde uno u otro paradigma indistintamente.

Algunos autores, sobre todo, Maidstone (2012) defiende que cualquier modelo SD bien formulado tiene un desarrollo equivalente en ABS, a pesar de la distinta naturaleza estocástica de estos últimos frente a lo determinista de los primeros. Opinión conceptual que comparten Tako y Robisson (2009a) quienes concluyen que los resultados que han podido constatar al aplicar unos u otros paradigmas de programación no son significativos (concretamente estos autores comparan DES y SD).

En esta misma línea, Brailsford (2012), indica que bajo su experiencia, todavía no ha encontrado un sistema que pudiendo ser representado por DES no pueda ser presentado por un modelo ABS, o al contrario, evidenciando por lo tanto desde el punto de vista práctico el solape de ambos métodos.

No cabe duda, no obstante, tal y como corrobora Maidstone (2012), que las técnicas DES han sido las más utilizadas en el mundo de la investigación operativa, opinión que es compartida por otros muchos autores y para lo que sólo es necesario hacer una búsqueda en internet de referencias bibliográficas de uno u otro paradigma, o simplemente fijarse en el recorrido histórico de unos u otros sistemas, en la variedad de campos en los que han penetrado (mucho más abundantes en el caso de DES que en el SD) o en el número de software comercial que se ha desarrollado bajo cada uno de los paradigmas (nuevamente con abrumadora mayoría de aplicaciones para desarrollos DES versus ABS o SD).

Así por ejemplo, fijándose en su recorrido temporal, según Law (2015) para el caso de simulación DES habría que remontarse a los años 50, mientras que tendría que esperarse hasta los 90 (pero de manera generalizada hasta el año 2005) para encontrar un progreso sustancial de los sistemas ABS.

⁵⁷ El efecto látigo fue enunciado en Forrester (1961) y, por ello, en la literatura especializada a veces es referenciado como efecto Forrester. El efecto látigo es un fenómeno operacional que se pone de manifiesto en las redes de distribución y que produce cambios cada vez más grandes aguas-arriba de la cadena; incrementando y haciendo mayores los inventarios o stocks de producto en respuesta a una dinámica oscilante en la demanda de los clientes. Así pequeñas oscilaciones de demanda final provocan que los inventarios vayan creciendo más y más en los puntos más lejanos de la cadena en tanto que los gestores de cada uno de los puntos de “stock” tratan de incrementar su “buffer de seguridad” (stock que tienen por encima de un nivel medio para atender posibles picos de demanda). Este fenómeno ha sido ampliamente cubierto por diversos autores entre los que se puede destacar la descripción de este efecto que puede encontrarse en la tesis doctoral de Martín-Adino (2006) así como los siguientes trabajos: Lee *et al* (1997), Chen *et al* (1998), Chen *et al* (2000a), Chen *et al* (2000b), Disney y Towill (2003), Zhang (2004), Sun y Ren (2005), Tempelmeier (2006), Selwyn (2008), Lee (2010), Cannella y Ciancimino (2010), Ciancimino *et al.* (2012), Bray y Mendelson (2012) y finalmente en Herlyn (2014).

Efectivamente, esta masiva utilización ha sido sin duda favorecida por la aparición de software comercial fácilmente accesible a bajo coste y por el propio efecto de “bola de nieve” que en el campo científico ha provocado la gran cantidad de publicaciones que pueden encontrarse abordando trabajos sobre el primer paradigma en detrimento del segundo y tercero (es decir, unos van alimentando a otros y abriendo nuevos campos de experimentación) y la variedad de sectores de actividad donde se han implementado.

Sin embargo, algunos autores defienden que en el futuro los sistemas DES irán dejando paso a los ABS.

A esta conclusión llegaron Siebers *et al.* (2010) tras un panel de discusión celebrado en el WSC del año 2010 bajo el ya auto-explicativo título “*Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation!*”⁵⁸.

Otros, sin embargo, salieron rápidamente en defensa de los modelos DES argumentando en su favor su simplicidad, accesibilidad, universalidad en la comunidad científica, bajo coste y menor tiempo para su aplicación práctica.

Entre ellos cabe destacar Brailsford (2012) bajo un no menos sugerente título “*Discrete Event simulation is alive and kicking!*” en respuesta al de Siebers *et al.* (2010) y donde la autora, sin negar el indudable auge que en la comunidad científica está tomando la simulación bajo ABS incide que las preferencias, habilidades y familiarización de los usuarios con las técnicas y software DES es un factor determinante y en tanto que no se demuestre que un problema modelado bajo ABS no pueda formularse bajo DES o viceversa, ambos sistemas coexistirán.

Este debate parece no cerrado a la fecha y todo parece apuntar a que se seguirán viendo desarrollos en todos y cada uno de los paradigmas anteriores.

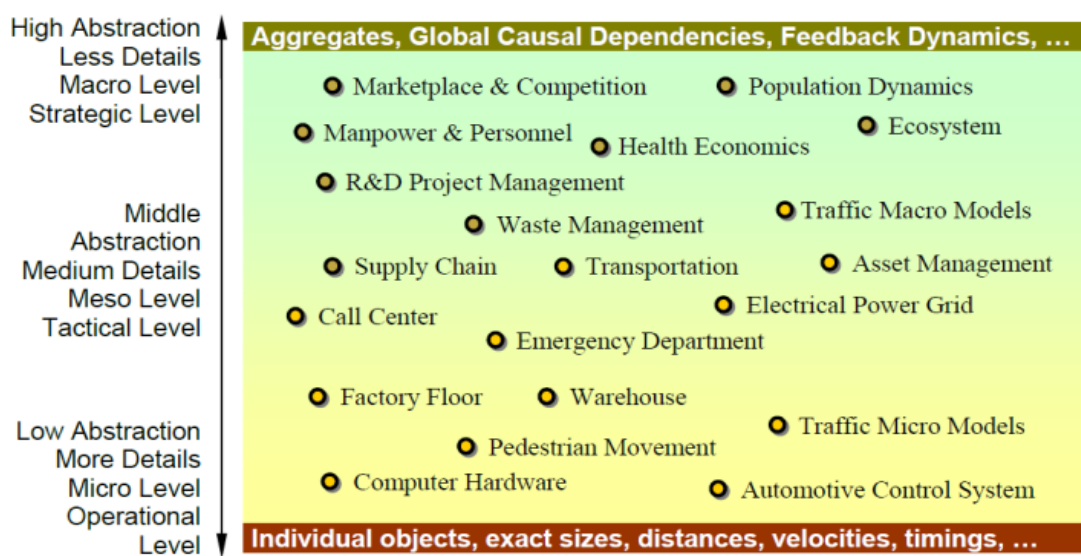
Borshchev y Filippov (2004) también presentan un mapa conceptual (ilustración 8) en el que tratan de explicitar cual ha sido el grado de despliegue de cada uno de los paradigmas anteriores en diferentes sectores donde se observa que el de transportes, cadena de suministro, modelización de tráfico o almacenaje (donde seguramente deberíamos englobar según qué clase de estudios portuarios) se sitúan en una zona media en cuanto al nivel de abstracción requerido, por lo que desde esta perspectiva podrían abordarse con garantías desde todos los paradigmas que se han repasado. Un poco más adelante se verá cómo, efectivamente, se pueden encontrar desarrollos de

⁵⁸ Según algunos de los autores que participaron en este panel, los ABS están todavía en un estado inicial de desarrollo si se comparan con los DES (comenzando en los primeros en los años 90 frente a los años 60 de los segundos), por lo que la falta un marco metodológico completo como el del que disfrutaban los DES y lo cual supone una barrera de acceso que impide a la fecha un uso más generalizado de los ABS entre investigadores o analistas. Siguiendo con estos postulados, Maidstone (2012) introduce como elementos que no están favoreciendo el uso de los modelos ABS: 1) la falta de un software comercial de fácil utilización, 2) el mayor tiempo necesario para el desarrollo de los modelos y, 3) la resistencia de los investigadores y analistas a moverse desde un campo cuya técnica está muy contrastada y que les es familiar (DES) a otra con un menor grado de desarrollo o simplemente más desconocida (ABS) y que a la postre no permite resolver problemas que no se solventen con el primer paradigma.

simulación portuaria tanto desde enfoques DES, como ABS o SD, lo que de una manera práctica parece corroborar la opinión de dichos autores.

Más información sobre las definiciones básicas de cada uno de estos sistemas y una comparación entre los tres paradigmas se puede encontrar, además de en los ya citados, en Borshchev y Filippov (2004) y en Maidstone (2012).

Ilustración 8. Aplicaciones prácticas de diferentes paradigmas de simulación conforme el nivel de Abstracción requerido.



Fuente: Borshchev y Filippov (2004).

La comparación entre los paradigmas DES y SD se encuentran en Sweetser (1999), Brailsford y Hilton (2001) y una combinación de ambos sistemas es presentado por Brailsford *et al.* (2010). Estos autores se especializan en el sector de la salud, mientras que Tako y Robison (2006, 2009a, 2009b) y Tako *et al.* (2009) se centran en problemas relacionados con la cadena de suministros ampliando a aspectos más generalistas en sus referencias del año 2009 (incluyendo como criterio la percepción propia de los usuarios al utilizar ambos sistemas).

Especialmente interesante resulta la exhaustiva revisión incluida en Tako y Robison (2006), autores que analizaron un conjunto de 65 publicaciones científicas en relación a ambos paradigmas publicadas en el decenio 1996-2006; llegando a la conclusión ya anunciada de que los sistemas SD se han adoptado cuando el tipo de decisiones a tomar es de carácter estratégico, mientras que los sistemas DES han tenido un campo preferente en los modelos que persiguen decisiones de tipo táctico.

En lo que se refiere a las diferencias entre DES y ABS son tratadas por Majid *et al.* (2009), Chan *et al.* (2010), Siebers *et al.* (2010) y más recientemente por Law (2015). Interesantes son las conclusiones a las que llega este último autor para quien, tras comparar las similitudes y

deferencias de ambos paradigmas, los modelos ABS no dejan de ser una subvariante de los modelos DES, opinión que también comparte Zupick (2016).

Por último, una comparación entre ABS y SD son recopiladas en Macal (2010), mientras que en un panel del WSC del año 2011 Heath *et al.* (2011) hacen un repaso y comparación de los tres paradigmas ABS, DES y SD y lo enriquecen con unas conclusiones sobre los retos de futuro que estos sistemas tendrán que afrontar.

En los últimos años, conforme se ha ganado en potencia computacional y se ha desarrollado un campo científico muy extenso en cada uno de los paradigmas anteriores; algunos autores han comenzado a utilizar sistemas híbridos en los que parte de la realidad experimental se modela bajo uno de los paradigmas y otra parte del mismo bajo otro enfoque; ensamblándose rutinas y secciones del modelo que se alimentan mutuamente. A estos sistemas que se desarrollan en un ambiente “multi-paradigma” se les viene denominando “HSS” (“*Hybrid Simulation Systems*”) o MPSF (“*Multiparadigm Platform Simulation Framework*”), y entre las referencias más significativas se pueden mencionar a Zeigler *et al.* (2000), Vangheluwe *et al.* (2002), Quesnel *et al.* (2007), Lara *et al.* (2008), Brailsford *et al.* (2010), Hodge *et al.* (2011), Ross *et al.* (2014) y Lynch *et al.* (2014).

Para entender conceptualmente el funcionamiento de estas plataformas multi-paradigma se puede citar Brailsford *et al.* (2010), quienes en un ejemplo práctico modelizan mediante técnicas DES el funcionamiento de una clínica en Portsmouth (Reino Unido); al que acoplan un modelo SD de propagación de una infección en su área de influencia (como se ha visto la dinámica de poblaciones se ajusta mucho más a esta técnica) para conocer la capacidad de respuesta de la clínica ante la aparición de un determinado brote. Estos dos modelos son conectados mediante una simple hoja de resultados e *inputs* bajo Microsoft Excel.

Estos nuevos ambientes de simulación MPSF están obteniendo respuesta comercial con la aparición de bibliotecas de simulación que dan respuesta a varios sistemas (como ejemplo se puede citar AIVIKA⁵⁹ que es un producto comercial que presenta funcionalidades tanto para DES como para SD) o software integrados que bajo un mismo lenguaje de programación es capaz de abordar los tres sistemas (AnyLogic®⁶⁰ quizá sea el primer desarrollo comercial que ha sido capaz de integrar de una manera sólida los tres sistemas en una misma herramienta multi-paradigma), o al menos dos de ellos (aquí se citaría VLE “*Virtual Laboratory Environment*” capaz de trabajar con los paradigmas SD y ABS y con formalismos propios de DES⁶¹).

⁵⁹ Véase <https://hackage.haskell.org/package/aivika>. [Fecha de último acceso el 01.05.2017].

⁶⁰ Véase www.anylogic.com. [Fecha de último acceso el 01.05.2017].

⁶¹ Véase : <http://www.vle-project.org/wiki/About>. [Fecha de último acceso el 01.05.2017].

Cabe destacar que si bien en el presente trabajo se utilizará esta clasificación de paradigmas por ser la que más se ajusta a la clasificación de modelos que tradicionalmente se acepta en ambientes portuarios y que permitirá desarrollar la tesis con una mayor precisión; otros autores ofrecen clasificaciones alternativas de paradigmas de programación (quizás éstas encuadradas y con mayor sentido en el campo puro de las ciencias de computación y programación). Por citar algún ejemplo, Nørmark (2013) establece como los paradigmas más relevantes el paradigma imperativo (“*imperative paradigm*”)⁶², paradigma funcional (“*functional paradigm*”)⁶³, paradigma lógico (“*logical paradigm*”)⁶⁴ y el paradigma orientado a objetos (“*object-oriented paradigm*”)⁶⁵ y como paradigmas de menor relevancia pero diferentes a los anteriores el paradigma visual (“*visual paradigm*”)⁶⁶, los paradigmas paralelos (“*parallel paradigms*”)⁶⁷ y los paradigmas basados en restricciones (“*constraint based paradigm*”)⁶⁸.

Otros autores como Torgersson (1996) prefieren hablar de paradigmas declarativos (“*declarative paradigms*”)⁶⁹, que contraponen a los paradigmas imperativos, simplificando la clasificación en dos grandes grupos que pasan a denominarse paradigmas fundamentales. Según este autor, dentro de estos paradigmas declarativos se encuentran los paradigmas lógicos, los funcionales (estos como híbridos de los dos anteriores) y los basados en constricciones incluidos en la clasificación de Nørmark (2013) de manera independiente.

Torgersson (1996) además incluye una subclase alternativa que denomina paradigmas de dominio específico (“*Domain-Specific Paradigm*” o “*DSL*” de “*Domain-Specific Language*”) y cuyo

⁶² Un paradigma imperativo funciona de una manera secuencial y estructurada y está basado en comandos y en flujo de control como elementos esenciales. Este paradigma describe cómo debe realizarse un cálculo pero no incide en lo qué debe calcularse. Vaca (2011) distingue dentro de este paradigma tres subclases: procedimental, estructurado y modular.

⁶³ Un paradigma funcional es un estilo de programación que se basa en la evaluación de expresiones o funciones que son el elemento fundamental de esta técnica de programación.

⁶⁴ Según Vaca (2011) la programación lógica es en realidad una subvariante de la programación declarativa (en contraste con la imperativa) que como de una manera sencilla pero muy clara explica uno de sus padres en Kowalski (1973), engloba a aquellos sistemas que responden a una lógica formal del tipo “*B if A₁ and A₂ and.... A_n*” donde B en el nombre del procedimiento (“*procedure name*”) y A₁, A₂,.... A_n son las llamadas al procedimiento (“*procedure calls*”).

⁶⁵ Un paradigma basado en objetos según Nørmark (2013) responde mejor a la frase que lo define “*Send messages between objects to simulate the temporal evolution of a set of real world phenomena*”. Este ya ha sido desarrollado con anterioridad por lo que no es necesario ampliar información sobre el mismo.

⁶⁶ Los paradigmas de programación visual (o “VPL” en literatura anglosajona del acrónimo de *Visual Programming Language*) engloban un conjunto de técnicas de computación en el que los clásicos códigos textuales son sustituidos por estructuras gráficas. Con ello se trata de hacer más accesible la programación, simplificando la generación de códigos y su utilización por no expertos en programación.

⁶⁷ Un paradigma de programación paralela es un paradigma o forma de cálculo en el que muchas de las instrucciones se ejecutan de manera simultánea o paralela con el objetivo de disminuir el tiempo de computación.

⁶⁸ La programación con restricciones (referenciado en literatura especializada como “CSP” del inglés “*Constraint Solving Problems*”) es un paradigma de programación que se basa en especificar en el código un conjunto de restricciones (formalmente ecuaciones) que deben ser satisfechas por cualquier solución que se esté intentando resolver. El programa es capaz de encontrar soluciones con estas condicionalidades sin necesidad de especificar cuáles deben ser los pasos o la secuencia que debe realizarse para encontrar la solución.

⁶⁹ Según Vaca (2011), el paradigma declarativo describe qué se debe calcular sin entrar en el detalle del cómo debe hacerse. Estos junto con los paradigmas imperativos son los que se denominan paradigmas funcionales.

contrapunto serían los paradigmas de propósito general (“GPL” or “*General – Purpose Language*”)⁷⁰.

Esta es la misma clasificación propuesta por Vaca (2011) quien agrupa los paradigmas en imperativos (que a su vez subdivide en procedimentales, estructurados y modulares⁷¹) y declarativos (que divide en funcionales, lógicos y reactivos⁷²). Al margen de estos dos grupos señala como paradigmas independientes de los anteriores la programación orientada a objetos, la programación basada en agentes y las que denomina técnicas de programación genérica⁷³ y

⁷⁰ Un paradigma de dominio específico (también conocido como de propósito específico o DSL del inglés “*Domain-Specific Language*”) es un lenguaje especialmente diseñado para un determinado entorno y para resolver unos problemas concretos. Este concepto se contrapone al de lenguaje de programación de propósito general (C++, Pascal, Java,...), “GPL” or “*General – Purpose Language*”. Según Wikipedia – DSL (2016) al contrario de lo que podría parecer estos sistemas tienen un alto grado de abstracción para el usuario, por lo que están dirigidos a expertos en el dominio en el que están pensados: También determina esta fuente que no es siempre sencillo establecer una línea de división entre los DSL y los GPL toda vez que estos últimos cuentan en muchas ocasiones con extensiones o librerías específicas para su aplicación en dominios concretos. En puntos posteriores de este trabajo se volverá sobre este tema tratando con mayor detalle los DSL específicamente diseñados para entornos portuarios.

⁷¹ Conforme Wikipedia – MP (2016) la programación modular, evolución de la programación estructurada, es un paradigma cuya base está en dividir un programa en módulos o subprogramas con el fin de hacerlo más legible y manejable. De esta manera es posible abordar problemas más complejos donde la búsqueda de soluciones sin dividir el mismo en subproblemas más pequeños sería muy complejo o incluso inabordable. Cada uno de las partes en las que se divide el programa se pasa a denominar “módulo”.

⁷² La programación reactiva es según Vaca (2011) una paradigma de tipo declarativo basado en la teoría de grafos mediante el cual el programa se basa en la especificación de un flujo de datos (este autor y otras fuentes llaman a este paradigma también “*dataflow*”). Siendo así, en esta técnica “*las variables se encuentran ligadas a las operaciones que proporcionan sus valores*” de tal manera que “*un cambio de valor de una variable se propaga a todas las operaciones en que participa*”. Wikipedia - RP (2016) incide en estos mismos conceptos, indicando que este paradigma se orienta alrededor de flujos y la propagación de los cambios a través de los flujos. En este mismo texto se pone un ejemplo muy gráfico al expresar que bajo paradigmas de programación imperativo cuando se evalúa una expresión matemática del tipo “ $a=b+c$ ”, el valor de “a” se calcula en el momento que se llama a esta función teniendo en cuenta los valores que en ese momento tienen las variables de “b” y “c”. El valor de “a” queda así fijado y si después cambian los valores de “b” y “c”, esta variable queda en el estado antiguo (sin actualización) hasta que nuevamente se llama a esta función y se recalcula. Por el contrario, en la programación reactiva los cambios en cualquier momento de “b” y “c”, conllevaría a una actualización automática de “a” sin necesidad de llamar a ninguna rutina o esperar a ninguna secuencia que requiera su nuevo cálculo, es decir, se programa de manera inmediata. Estos sistemas han tenido un campo de aplicación prioritario en la creación de interfaces de usuario interactivas y animación en tiempo real. Según esta fuente bibliográfica el enfoque reactivo se ha acoplado tanto a la programación orientada a objetos (conociéndose como OORP de “*Object Oriented Reactive Programming*”), la programación imperativa (“CIP’s” o “*constraint imperative programming*”) o la programación funcional (“FRP” o “*Functional reactive programming*”). Sobre la utilización de paradigmas reactivos en animación puede leerse Elliott y Hudak (1997), para profundizar en la técnicas reactivas implementadas sobre paradigmas funcionales o “FRP’s” puede leerse Nilsson *et al.* (2011), para más información sobre la estructura y codificación de estas técnicas acopladas en paradigmas con construcción o “CIP’s” en Demetrescu *et al.* (2011). Por último para analizar la programación reactiva orientada a objetos u “OORP” puede consultarse González *et al.* (2013).

⁷³ Conforme Gregor (2013a) y Wikipedia - PG (2016) la programación genérica es un paradigma que se basa mucho más en los algoritmos que en los datos, con ello lo que se trata es de generar estructuras o generalizar funciones que puedan utilizarse más de una vez y en diferentes contextos. Esto obliga a que deben implementarse con un alto grado de parametrización. Además, el código del programa debe generar salidas de las funciones de la forma más simple posible y evitar proporcionar datos o resultados concretos. Con esto se consigue que las librerías que se generen puedan ser útiles en más aplicaciones concretas y que a su vez puedan mejorarse y ampliar su campo con cambios también relativamente sencillos. Gregor (2013a) cita como pioneros de estos sistemas a Alexander Stepanov y David Musser y enfatiza que este paradigma requiere un gran nivel de abstracción para que pueda maximizarse la “reusabilidad” de las funciones o algoritmos en el máximo número de aplicaciones posibles y defienden que su máximo éxito fue cuando la biblioteca “*Standard Template Library*” se incorporó a los estándares “ANSI/ISO C++”. Como software específico sobre este paradigma cita *Concept C++*, (extensión de C++ para utilización en programación genérica), *ConceptGCC* (derivado del GNU C++ compiler), *ConceptClang* (que define como una implementación de C++ en Clang) y un conjunto de librerías específicas de programación genérica como son la “*Standard Template Library* (STL)” de la que ya se ha hablado pero otras como, “*Matrix Template Library* (MTL)”, “*Computational Geometric Algorithms Library* (CGAL)”, “*Boost*”, “*Boost Graph Library* (BGL)”, “*Iterative Template Library* (ITL)” y la “*Iterative Eigensolver Template Library* (IETL)”, detalles de las cuales se pueden ver en Gregor (2013b).

métodos de programación concurrente⁷⁴, si bien y en este último caso, Wikipedia - CC (2016) lo engloban dentro una subclase de programación imperativa modular más que como un grupo independiente.

Por último, se concluirá señalando que otros autores ofrecen una visión diferente e incluyen otras variantes de paradigmas. Así, Turban (1995) da naturaleza de paradigma a los DSS (*“Decision Support Centre”*⁷⁵) o Kayame *et al.* (2014) a los LSS (*“Learning Support Systems”*⁷⁶).

Si bien los sistemas LSS están muy centrados en el mundo de la enseñanza (y de manera específica en las técnicas de e-learning) de los sistemas DSS se ha encontrado alguna trasposición al mundo portuario como Koh *et al.* (1994a y 1994b), Murty *et al.* (2000), y los más reciente de Hasan (2012) o Ursavas (2014) que entran indudablemente en el alcance de esta tesis doctoral.

1.3.3 Lenguajes de programación, lenguajes de simulación y paquetes de simulación.

1.3.3.1 Lenguajes de programación, lenguajes de simulación y paquetes de simulación. Introducción.

Hoy en día y tras más de cincuenta años desde que aparecieran las primeras herramientas de simulación hay cierto consenso en dividir las técnicas de simulación en tres grandes bloques:

- Técnicas que se basan directamente en la utilización de lenguajes de programación de propósito general;

⁷⁴ La programación concurrente se basa en la simultaneidad de ejecución de tareas (o procesos) que son interactivas entre sí. Está relacionada pero no es lo mismo que la programación paralela puesto que la recurrente requiere que los procesos que se ejecutan de manera simultánea se comuniquen e interactúen entre sí coordinándose.

⁷⁵ Según Turban (1995) un DSS es un *“sistema de información basado en un computador interactivo, flexible y adaptable, especialmente desarrollado para apoyar la solución de un problema de gestión no estructurado y para mejorar la toma de decisiones. Utiliza datos, proporciona una interfaz amigable y permite la toma de decisiones en el propio análisis de la situación”*. Una variante de los DSS serían los “IDSS” de *“Intelligence decision support systems”* que llevan el campo de la inteligencia artificial a los DSS. Mas información sobre los IDSS puede consultarse en la tesis doctoral de Holsapple (1977) o en textos más modernos de Turban *et al.* (2005) obra muy completa sobre estos sistemas, Tariq y Rafi (2012) o Wikipedia IDSS (2016). De aplicación muy directa a campos similares al objeto de este trabajo se podría destacar a Hasan (2012) quien aplica estos sistemas a un caso específico para sistemas de gestión del tráfico.

⁷⁶ Más información sobre LSS puede encontrarse en Wikipedia LSS (2016) o consultando Fan y Yao (2003) y Owan (2008) y para remontarnos más a sus orígenes el texto completo recogido en Gagne y Driscoll (1988). Para hacer un seguimiento de los avances de estos sistemas se puede seguir el *“International Journal of Instructional Technology and Distance Learning”* magazine de referencia en este campo cuyo editor, Stephen Downes, es reconocido como pionero en el diseño de los sistemas masivos de aprendizaje y uso de computadores y tecnologías on-line en enseñanza. En los últimos años, como segunda evolución de estos sistemas se habla de los “LPSS” (de *“Learning Performance Support Systems”*) también desarrollador por S. Downes, pudiendo encontrar más información sobre éstos en Wollenweber (2015) y que se basan en una mayor interacción de la persona que los utiliza sobre su proceso de aprendizaje, customizando más sus necesidades y poniendo en juego un producto *ad-hoc* para el mismo en el que se tienen mucho más presente sus necesidades reales.

-
- Las que utilizan entornos específicos de simulación y que vienen a denominarse lenguajes de simulación, y
 - Aquellas que se basan en desarrollos y herramientas personalizados y que no requieren de conocimientos avanzados de programación o incluso de las bases teóricas de simulación: los paquetes de simulación, también conocidos como “simuladores” o “plataformas de simulación”.

1.3.3.2 Lenguajes de programación.

Los lenguajes de programación de propósito general (Pascal, FORTRAN, C/C++, ALGOL, JAVA,...) son entornos abiertos y por ello suelen ofrecer mayor rendimiento/velocidad pero, lo que es más importante, mayor flexibilidad y portabilidad para adaptar el modelo a cualquier tipo de problema y evento experimental.

En su contra, al no estar diseñados específicamente para realizar simulaciones, su programación suele ser más lenta y requiere siempre de conocimientos de programación, estando por tanto más limitada su aplicación a un “reducido” número de profesionales que no siempre conocen los detalles técnicos del entorno real que se quiere simular.

En efecto, según Charles Harrel, cuando habla de su experiencia práctica como ingeniero de producción en un proyecto de modelización en la década de los 70 en la compañía automovilística Ford Motor⁷⁷, los lenguajes de programación requerían largos tiempos de preparación (construcción del modelo) y dichos modelos eran creados además por informáticos o programadores profesionales que no necesariamente entendían la realidad que se trata de modelizar y cómo funcionaba el sistema real, lo que introducía más fácilmente errores conceptuales (más allá de fallos de programación). Estos dos errores de enfoque: (1) largo tiempo de creación del modelo que impedían su aplicación práctica en casos reales con la velocidad requerida por la industria, y (2) riesgos de errores en la conceptualización del modelo; impulsaron la aparición tanto de lenguajes de simulación como de simuladores propiamente dichos.

Siendo así, sigue contando C. Harrell que la dirección de Ford tomó la decisión de que sería más efectivo formar un ingeniero de producción en técnicas de simulación y encomendarle que desarrollara un software específico. El fue el elegido.

Así fue como C. Harrel tomó experiencia en simulación bajo GPSS (el lenguaje de simulación de moda en la época) y acabó escribiendo su propio código para Ford (trabajando conjuntamente con el programador Harry Truax). Dicho simulador fue denominado GENTLE (*GEN*eral *Tran*sfer

⁷⁷ Véase Promodel (2012).

Line Emulator), simulador de propósito específico para estudiar las líneas de producción de Ford que siguió siendo usado muchos años después de su creación.

Dentro de los lenguajes de programación que más han influenciado las técnicas de simulación es necesario destacar la Programación Orientada a Objetos⁷⁸ (conocidas como por su acrónimo en inglés OOP de *Object-Oriented Programming*).

La OOP utiliza objetos como elementos nucleares en sus códigos para la construcción de la solución. Conforme Wikipedia OOP (2016), un objeto se puede definir como “*una abstracción de algún hecho o ente del mundo real, con atributos que representan sus características o propiedades, y métodos que emulan su comportamiento o actividad. Todas las propiedades y métodos comunes a los objetos se encapsulan o agrupan en clases. Una clase es una plantilla, un prototipo para crear objetos; en general, se dice que cada objeto es una instancia o ejemplar de una clase*”.

Para entender las diferencias entre la OOP y la clásica programación estructurada, esta misma referencia expresa que “*La OOP difiere de la programación estructurada tradicional, en la que los datos y los procedimientos están separados y sin relación, ya que lo único que se busca es el procesamiento de unos datos de entrada para obtener otros de salida. La programación estructurada anima al programador a pensar sobre todo en términos de procedimientos o funciones, y en segundo lugar en las estructuras de datos que esos procedimientos manejan. En la programación estructurada solo se escriben funciones que procesan datos. Los programadores que emplean programación orientada a objetos, en cambio, primero definen objetos para luego enviarles mensajes solicitándoles que realicen sus métodos por sí mismos.*

Los objetos son entidades que se pueden definir por tres características básicas: estado, comportamiento (método) e identidad:

- El estado: información y datos. Corresponden con ciertos atributos a los que se asignan unos valores concretos (datos).
 - El comportamiento: Métodos o mensajes que “estimulan” el objeto y a los que éste sabe responder, dicho de otro modo, el comportamiento son las operaciones que se pueden realizar en el objeto.
 - La identidad: Característica de determinado objeto que lo diferencia del resto; es por lo tanto su identificador.
-

En un plano superior, los objetos interactúan entre sí, mediante mecanismos de interacción que se denominan métodos y que facilitan la comunicación entre ellos y que provocan el cambio de estado de los mismos. Siendo así, los objetos se presentan en este paradigma como unidades indivisibles e independientes.

Hoy se reconoce que la OOP tuvo como origen *SIMULA 67* siendo más tarde refinada por *Smalltalk*, desarrollado así mismo en el lenguaje *SIMULA*, pero bajo un entorno dinámico en contrapunto de la aproximación estática de éste (es decir los objetos se podrían crear y modificar "sobre la marcha", contemporáneamente al tiempo de ejecución).

El gran auge de esta técnica vino probablemente en la década de los 80, con el desarrollo de *C++* (extensión del lenguaje *C*) y *Visual BASIC* así como con la llegada de las interfaces gráficas de usuario⁷⁹ para las cuales las OOP están especialmente indicados y que dieron el punto de salida a una variante que hoy se conoce como Programación Orientada a Eventos⁸⁰.

En el epígrafe 1.3.1, ya se ha señalado de manera resumida las diferencias entre la programación por eventos, procesos y actividades, pudiendo volver a lo allí comentado para evitar duplicidades.

Después de *C++* o *Visual Basic* llegaría *JAVA*, soportado por la revolución de Internet, y que derivó en la implantación de máquinas virtuales bajo este lenguaje en la mayoría de los navegadores.

Hoy en día son muchos los lenguajes de programación basados en OOP. Entre ellos se pueden destacar los que se incluyen en la tabla 2.

⁷⁹ Según Wikipedia IGU (2016): “La interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI (del inglés *Graphical User Interface*) es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Su principal uso, consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para permitir la comunicación con el sistema operativo de una máquina o computador”.

⁸⁰ Según Wikipedia PDE (2016): “La programación dirigida por eventos es un paradigma de programación en el que tanto la estructura como la ejecución de los programas van determinados por los sucesos que ocurran en el sistema, definidos por el usuario o que ellos mismos provoquen” ...” Para entender la programación dirigida por eventos, podemos oponerla a lo que no es: mientras en la programación secuencial (o estructurada) es el programador el que define cuál va a ser el flujo del programa, en la programación dirigida por eventos será el propio usuario —o lo que sea que esté accionando el programa— el que dirija el flujo del programa. Aunque en la programación secuencial puede haber intervención de un agente externo al programa, estas intervenciones ocurrirán cuando el programador lo haya determinado, y no en cualquier momento como puede ser en el caso de la programación dirigida por eventos”.

Tabla 2. Los lenguajes de programación basados en OOP.

ABAP	ABL	ActionScript
ActionScript 3	Ada	C++
C#	Clarion	Clipper1
D	Object Pascal	Gambas
GObject	Genie	Harbour
Eiffel	Fortran 90/95	Java
JavaScript2	Lexico3	Objective-C
Ocaml	Oz	R
Pascal	Perl4	PHP5
PowerBuilder	Python	Ruby
Self	Smalltalk6	Magik (SmallWorld)
Vala	VB.NET	Visual FoxPro7
Visual Basic 6.0	Visual DataFlex	Visual Objects
XBase++	Lenguaje DRP	Scala8

Fuente: Wikipedia OPP (2016).

1.3.3.3 Lenguajes de simulación.

Los lenguajes de simulación representan un paso intermedio entre los lenguajes de programación y los simuladores, siendo más flexibles los primeros que los últimos, pero también exigiendo cierto grado de conocimiento de programación.

Y es que, efectivamente, los lenguajes de simulación son entornos de desarrollo específico para ejercicios de simulación, realizados para facilitar las tareas de programación para este campo concreto y contando con herramientas básicas comunes a cualquier tipo de simulación que evitan tener que ser programados “*ad-hoc*” en cada aplicación (como exigiría un lenguaje de programación de uso general) requiriendo por tanto menor tiempo en su desarrollo.

Efectivamente, según Raffo (1999) un “*lenguaje de simulación es un software de simulación de naturaleza general y posee algunas características especiales para ciertas aplicaciones [prácticas concretas]...El modelo es desarrollado usando las instrucciones adecuadas del lenguaje y permitiendo al analista un gran control para cualquier clase de sistema*”.

Por su parte, “*un simulador (o de propósitos especiales) es un paquete de computadoras que permite realizar la simulación para un ambiente específico, no requiriendo esfuerzo en programación... permitiendo un menor tiempo en el desarrollo del modelo, así como también contar con el personal sin experiencia en simulación [para su explotación]*”.

Para Rodríguez y Rubén-Quesada (2009), los lenguajes de simulación producen un código más legible, modificable y menos largo que los lenguajes de programación, lo que minimiza el número de errores y facilita su localización. Los paquetes de simulación “*proporcionan bloques de construcción ya programados que el usuario puede seleccionar y ensamblar en el orden que necesita para formar el modelo del sistema particular que desea construir, lo que facilita mucho*

esa tarea con respecto a los lenguajes, ya que no es necesario programar. Su principal ventaja es el ahorro de tiempo, y la desventaja es su poca flexibilidad ya que sólo permiten simular los sistemas para los que fueron definidos”.

Como indica Villareal (2013) los lenguajes de simulación permiten al programador crear modelos muy complejos con pocas líneas de código, corriendo los modelos y recogiendo los resultados y estadísticas que reflejan el comportamiento del modelo de una manera muy rápida.

Dentro de los lenguajes de simulación cabe destacar: *SIMSCRIPT*, *GASP*, *SLAM*, *SIMAN*, *SIMULA*, *CSIM*, *GPSS*, *MODSIM*, *SLX* o *SJJ*, los cuales se basan en lenguajes de programación de propósito general tales como *FORTRAN* (este es el caso de *SIMSCRIPT*, *GASP*, *SLAM* o *SIMAN*), *ALGOL* (este el caso de *SIMULA*), *C/C++* (sobre el que se construye originalmente *CSIM*) o *JAVA* (referencia para el *SJJ* o para el *JavaGPSS*⁸¹).

Los primeros lenguajes de simulación aparecidos en el mercado (*SIMULA*, *GPSS*, *SIMSCRIPT*, *GASP*, *SLAM* o *SIMAN*) ya han sido tratados en apartados previos por lo que no volverán a ser tratados. Sin embargo, a continuación se abordarán unos subapartados para describir aquellos aún no descritos y que han tenido (o tienen) cierta relevancia.

1.3.3.1 Lenguaje de Simulación *SLX*.

En primero lugar, se define el *SLX*, acrónimo de “*Simulator Language with Extensibility*”. Se trata de un lenguaje de simulación desarrollado por *Wolverine Software*⁸² y relativamente extendido, presentando como principal característica su extensibilidad y como ventaja su flexibilidad en comparación a otras herramientas comerciales (al ser éste un lenguaje y no un simulador propiamente dicho) y su evolución con respecto a otros lenguajes de simulación (algunos de ellos ciertamente descontinuados).

Según sus propios creadores, en su desarrollo siguieron las fortalezas conceptuales que ofrece el más famoso lenguaje de simulación (*GPSS*) pero quisieron reforzarlo en términos de extensibilidad, modularidad y generalidad. Sin duda *GPSS* puede considerarse como el antecedente de *SLX* (Henriksen, 1976, 1985 y 1993)

Conforme *Wolverine Software Corporation* (s/f) y Henriksen (2000) este lenguaje de simulación de propósito general está estructurado en varias capas presentando paquetes e interfaces especialmente pensados para usuarios no expertos en simulación que permiten al usuario desarrollar y “personalizar” su propio modelo. Esta es la principal diferencia con otros lenguajes

⁸¹ *JavaGPSS* es un desarrollo que basándose en los principios de *GPSS* utiliza también como lenguaje de programación *JAVA*, contrastando con *GPSS* y alguna de sus versiones que pueden considerarse como un lenguaje de programación-simulación, es decir, no se soporta como otros lenguajes de simulación en uno de programación sino que incluye su propio desarrollo. *JavaGPSS* (también conocido como *JGPSS*) es tratado en Ulrich *et al.* (1998) y Fonseca i Casas y Casanovas (2009).

⁸² Empresa fundada en 1976 por James O. Henriksen.

de programación o simulación que, como por ejemplo el *GPSS*, no ofrecen esa estructura en capas⁸³.

1.3.3.3.2 Lenguajes de Simulación herederos de SIMSCRIPT: MODSIM, SIMFACTORY II.5, NETWORK II.5, LANNET II-5 y COMNET II.5.

Como se ha comentado en el apartado 1.2.6 el primer modelo basado en *FORTRAN* con clara vocación comercial fue *SIMSCRIPT*, originalmente impulsado por L.H. Markowitz y en el que contribuyó de manera decisiva P. Kiviat.

Este modelo ha sufrido sucesivas actualizaciones siendo quizá *SIMSCRIPT II.5* la más relevante. Esta versión sería lanzada en 1973 (Kiviat *et al.*, 1973) y tendría más trascendencia que versiones posteriores como *SIMSCRIPT III* al tenor del número de aplicaciones que utilizando su código se desarrollaron a finales de la década de los 80 o principios de los 90.

Un primer lenguaje de simulación que se puede considerar claro sucesor del desarrollo de *SIMSCRIPT II.5* es *MODSIM* (de “MODular SIMulation Language”). Este sistema vio la luz a finales de los años 80 encontrando una primera referencia bibliográfica en Bryan (1989) quien al definir el lenguaje pone en valor su versatilidad indicando que podía ser implementado tanto en procesadores secuenciales como paralelos.

MODSIM II es fruto de los trabajos de O.F Bryan Jr. y R. Balanger quienes presentaron sus trabajos en Balanger (1990) en ocasión de la WSC celebrada en el año 1990 en Washigton (Estados Unidos).

El primer manual de usuario se presentaría en Balanger y Mullarney (1990) junto con su primer manual de referencia incluido en Balanger *et al.* (1990). Un año más tarde Rusell (1991) ofrecería una descripción completa del sistema.

Wood y Tumay (1999) definen *MODSIM* como un lenguaje de simulación de propósito general inicialmente basado en programación modular y paradigma DES pero que hoy en día ha evolucionado a *OOP* (siguiendo los pasos de la tercera generación de su antecesor *SIMSCRIPT*). Este nuevo lenguaje puede considerarse descendiente también de *SIMULA* y *MODULA -2* y al igual que el *SIMSCRIPT* fue desarrollado y comercializado por CACI.

La primera versión de *MODSIM* se lanza comercialmente bajo el nombre *MODSIM-II*⁸⁴, y sigue en realidad los pasos de *SIMSCRIPT-II* aunque con cierto decalaje temporal (*SIMSCRIPT-II*

⁸³ Con *GPSS* en realidad puedes virtualmente crear dos capas pero, la segunda debe construirse fuera de los límites del propio lenguaje de simulación en subrutinas programadas en *C* o *FORTRAN*.

⁸⁴ Efectivamente no se ha encontrado en la literatura científica ni en la página web de CICA ninguna referencia a un posible *MODSIM - I*.

apareció a principio de los 70 mientras que *MODSIM-II* vio la luz a finales de la década de los 90),

A esta primera versión sigue el lanzamiento de *MODSIM-III* (probablemente en 1996 fecha en la que data su manual de usuario y de referencias⁸⁵ y en la que se hace su presentación a la comunidad científica⁸⁶) que, esta vez, se adelanta a *SIMSCRIPT-III*.

En efecto, las primeras referencias encontradas sobre *SIMSCRIPT III* aparecen a mediados de la década del 2000, siendo citado por primera vez en nuestra búsqueda en Rice *et al.* (2005) si bien el manual de usuario data de 2007 y viene referenciado en CACI (2007).

En la actualidad cabe destacar que CACI ha ofrecido *SIMSCRIPT III* como remplazo natural del lenguaje de simulación *MODSIM III*, anticipando que el mismo sea probablemente discontinuado y volviendo a los orígenes de este desarrollo. Para ello ha puesto en el mercado una aplicación que permite la migración desde uno a otro. Con ello *SIMSCRIPT III* ha desplazado del mercado a *MODSIM III*, y es que el primero ha incorporado todas las características del segundo pero mejorando el motor de simulación que es ahora más eficiente disminuyendo el tiempo de computación.

Casi al mismo tiempo que CACI lanzaba *MODSIM*, la empresa lanza una serie de lenguajes de programación variantes de la versión *SIMSCRIPT II-5* y que se aplican a campos de actividad muy específicos.

Quizá el primero de esta serie que se puede citar sería *SIMFACTORY II.5*, modelo de propósito específico diseñado para procesos de fabricación que CACI desarrolla en el año 1990⁸⁷ y que se escribe en códigos de *SIMSCRIPT II*. Sería su desarrollador jefe J. Goble quien lo presentara en Goble (1991) en el WSC del año 1991.

Un año más tarde y esta vez relacionados con la modelización de computadores y redes de comunicaciones, CACI lanza *NETWORK II.5*⁸⁸, que acompaña de un software específico para simulación de redes locales de datos que denominaría *LANNET II-5*⁸⁹ y otro para redes de comunicaciones que etiquetará como *COMNET II.5*⁹⁰. Nuevamente todos ellos estaban basados

⁸⁵ CACI (1996).

⁸⁶ Trabajos de Mullarney (1996) presentados en el WSC del año 1996 y posteriormente trabajos de Globe (1997), Marti (1999), Wood y Tumay (1999) y Karakaneva (1999).

⁸⁷ CACI (1990) y Goble (1990).

⁸⁸ CACI (1991a) y Garrison (1991a).

⁸⁹ CACI (1991b).

⁹⁰ CACI (1991c).

en los códigos de *SIMSCRIPT II.5* y desarrollados en el año 1991 por W.J. Garrison, asociado de la firma CACI que los presenta al público en el WSC de 1991 en su trabajo Garrison (1991b).

1.3.3.3 Lenguaje de Simulación CSIM.

CSIM es una plataforma de simulación de propósito general fundamentada en técnicas DES pero que permite el trabajo con agentes formulando modelos de tipo ABS.

Originariamente estructurada sobre lenguaje C (Schwetman, 1986 y 1988), posteriormente evolucionó a C++ (Schwetman, 1995) y más tarde también permitió desarrollos en JAVA (Schwetman, 2005).

Haciendo un poco de historia y repasando su evolución, este lenguaje de simulación es probablemente presentado en sociedad en Schwetman (1986), describiéndolo con mayor detalle y definiéndolo como un modelo para “*sistemas complejos*” en Schwetman (1988).

Pocos años después en Schwetman (1990b) se publica lo que sería el primer manual de referencia sobre la versión 14 del programa, que ampliaba la información previa incluida en Schwetman (1990a). En 1995 ya se contaba con una versión 17 (Schwetman, 1995) y un año después con la versión 18 (Schwetman, 1996) quien la define para entonces como un “*motor de simulación*”.

En la actualidad y conforme se indica en la página web oficial de sus licenciarios cuenta con una versión 20 (*CSIM 20*) extremo que se pone de manifiesto en Schwetman (2009) y que permite observar una ralentización en el desarrollo de este proyecto en la última década que vivió su máxima expansión en los primeros años 90.

Al margen de este producto comercializado por *Mesquite Software Inc*, también hay otro software de simulación que se comercializa como *CSIM* y que sin tener relación con el anterior parece haber surgido con posterioridad, pero al rebufo de éste.

Este último es según reflejan sus creadores el CSIM (2015), un conjunto de herramientas y bibliotecas que permiten programación de sistemas paralelos corriendo simulaciones y permitiendo su visualización,

Esta característica de simulación de sistemas paralelos es compartida con el producto de *Mesquite Software Inc*. tal y como queda puesto de manifiesto en Panda *et al.* (2007).

A la fecha de redacción de esta tesis la última versión de este otro sistema fue lanzada en el año 2013 bajo el nombre de *CSIM-v4.10*⁹¹. Las versiones conocidas como familia “v4” fueron

⁹¹ CSIM (2016c)

lanzadas en el año 2012, mientras que las “v3” lo fueron en el año 2007 y las “v2” en 2003 (conocidas por entonces como *CSIM-II*)

Si bien se puede utilizar para otros campos, las referencias encontradas en este sistema se centran, fundamentalmente, en el diseño de redes y colas, circuitos, sistemas de hardware y software y funcionamiento de programas, funciones y subrutinas; teniendo poca implantación en el campo logístico o portuario; hecho que se puede contrastar en CSIM (2016a y 2016b).

1.3.3.4 Simuladores o paquetes de simulación.

Como ya se ha anticipado se consideran “simuladores” o “paquetes de simulación” a aquellas herramientas de simulación que se desarrollan para entornos muy específicos y bajo una estructura de mayor simplicidad lo que permite su utilización por un público más universal.

Conforme explican Born y Ståhl (2008) los paquetes de simulación o simuladores se pueden clasificar en dos tipos: 1) los sistemas basados en bloques (“BBS” de “*Block Based Systems*”)⁹² y los sistemas orientados a animación (“AOS” de “*Animation Oriented Systems*” que algunos autores traducen también como “*Application-Oriented Simulator*”)⁹³.

En los simuladores AOS cada servidor aparece representado una única vez en el espacio de simulación mientras que en los BBS los servidores se pueden encontrar en diversas localizaciones. Como consecuencia de esto, los sistemas AOS son más apropiados cuando es necesaria una animación detallada para representar un sistema físico (p.e. una línea de montaje en una fábrica), mientras que los sistemas BBS representan ciertas ventajas en relación a la simplicidad de la programación y velocidad del procesado (estos sistemas se suelen utilizar para modelizar sistemas financieros, stocks, etc.)

Dentro de los paquetes de simulación se puede citar el software comercial como *ARENA* (quizá el más extendido y que surgió como ya se ha visto de una evolución del lenguaje de simulación *SIMAN*) y, sin ánimo de ser exhaustivos, otros como *AweSIM* (evolución del lenguaje de simulación *SLAM-II*), *ExtendSIM* (originalmente denominado *Extend*), *AutoMOD*, *Promodel*, *Witness*, *OPNET* y *SIMUL8*.

En el siguiente apartado se realiza una breve introducción sobre los simuladores comerciales y los paquetes disponibles en el mercado que más han sido utilizados en el ámbito portuario.

⁹² Según Born y Ståhl, (2008) dentro de este grupo estarían: *GPSS* y sus sucesivas versiones, *SIMAN/ARENA* y *SLAM/AweSIM*.

⁹³ Según Born y Ståhl (2008) dentro de este grupo encontraríamos, por citar algunos ejemplos significativos: *ProModel*, *Witness*, *Automod*, y *SIMUL8*.

1.3.3.4.1 Simuladores comerciales. Introducción.

En la actualidad existen infinidad de alternativas posibles para aquellos investigadores que quieran abordar un proyecto de simulación sin la necesidad de disponer necesariamente de los conocimientos de programación que requieren los lenguajes de programación o lenguajes de simulación.

En el presente apartado repasaremos, aunque sea de una manera no muy detallada, algunos de los simuladores más extendidos en el ámbito comercial o académico, así como algunos otros que han sido utilizados en experiencias prácticas concretas en ambientes portuarios.

También, se analizarán en esta tesis alguna de las herramientas que se han desarrollado e implementado con éxito con extensiones o bibliotecas específicas especializadas en puertos (mayoritariamente en gestión de terminales de contenedores), y que les han hecho configurarse como verdaderos simuladores de propósito especial portuario.

Es la intención de este apartado realizar una descripción sintética del software más utilizado, identificando donde sea posible el paradigma de programación, su evolución histórica y quienes han sido sus desarrolladores (lo que en determinadas ocasiones ayuda a comprender sus orígenes y evolución).

La exposición de estas herramientas no pretende ser ni una descripción exhaustiva de las mismos (para lo que pueden consultarse las referencias bibliográficas y tutoriales que se citan) ni un juicio crítico sobre su bondad, aplicabilidad o rendimiento a entornos portuarios u a otros cualesquiera (aspectos fuera del ámbito de esta tesis de revisión y enumeración de las herramientas disponibles).

Cabe destacar el recomendable enlace web Rizzoli (2009), donde el autor incluye un extenso inventario de herramientas a la fecha de ejecución con una descripción pormenorizada de un amplísimo conjunto de simuladores con indicación de sus propiedades y enlaces a sus casas comerciales donde también se puede ampliar información sobre precios, características y potencialidades de las herramientas incluidas en el inventario.

Este autor clasifica los simuladores en diez grupos o categorías:

- Lenguajes de simulación y ambientes integrados,
- Simulación basada en *World Dynamics* (Sistemas Dinámicos o “SD”),
- Simulación basada en Agentes (“ABS”),
- Simulación basada en web,

-
- Herramientas de simulación híbridas,
 - Simulación mediante sistemas gráficos (“*Bond Graph*”),
 - Herramientas de visualización,
 - Recursos de modelización y simulación,
 - Librerías de software de simulación; y finalmente,
 - Simulación de procesos industriales y sistemas de redes.

1.3.3.4.2 Simuladores comerciales. Breve descripción.

1.3.3.4.2.1 ARENA®.

Este software fue presentado en Pegden y Davis (1992), pero como señalan Takus y Profozich (1997) no fue lanzado comercialmente hasta 1993. Fue desarrollado por *Systems Modelling* y, posteriormente, adquirido por *Rockwell Automation* en el año 2000.

Este software de simulación fue inicialmente diseñado como sistema DES estando escrito en *Visual C++* y construido sobre el lenguaje de simulación de *SIMAN* y es quizá hoy el software de simulación más extendido y de mayor influencia tal y como reflejan en un ranking sobre diferentes paquetes de simulación incluida en Dias *et al.* (2011).

Según Takus y Profozich (1997), *ARENA* en sus primeros desarrollos permitía construir el modelo gráficamente de una manera sencilla y generaba automáticamente el código *SIMAN* que permitía correr el modelo y obtener sus resultados.

Desde el principio fue concebido en entorno Windows y, para usuarios avanzados, permite acoplar desarrollados en *C++* o *Visual Basic*, e importar ficheros de programas Microsoft Office (Excel, Access, ...) y entornos gráficos creados con *AUTOCAD* o cualquier otro programa de diseño gráfico capaz de generar ficheros de extensión *.*dxf*.

Para conocer los detalles teóricos y prácticos necesarios para la realización de simulación con *ARENA* se pueden consultar una multitud de libros y manuales editados por diferentes autores. Entre ellos se puede destacar Altiok y Malamed (2007), Kelton *et al.* (2009), Rossetti (2010) y, especialmente por ser el más reciente, Kelton *et al.* (2014).

Las características antes descritas aumentaban la “usabilidad”, flexibilidad y transversalidad de *ARENA* con otros entornos y sistemas, hecho que fue fundamental en su difusión y, en su momento, fueron un elemento novedoso.

Así, *ARENA* es reconocido como el paquete comercial de simulación más extendido en el mundo con más de 350.000 usuarios, basando su estrategia comercial en la mencionada extensibilidad (acople a subrutinas *C++* o *Visual Basic*) y posibilidad de integración (conexión con aplicaciones de Microsoft) lo que le otorga una mayor flexibilidad que otros paquetes de simulación comerciales, y que ha contribuido a su extensión en ámbitos comerciales y de investigación. Datos que parecen confirmar las conclusiones de Dias *et al.* (2011) y su privilegiado primer puesto en el ranking de simuladores desarrollados por estos autores.

Es, además, un paquete que ha sido sometido a un continuo proceso de mejora y actualización y, así, en el año 2001 ya se contaba con una versión 4.0, en el año 2003 había evolucionado a la versión 7.0, en el año 2007 con la versión 10, en el año 2012 con la versión 12 y en el año 14 con la 14. En el presente, y revisando la página web de la compañía desarrolladora en septiembre de 2016 se lanzó la versión 15. Esto supone prácticamente una nueva versión cada año.

En el proceso de mejora de esta herramienta, la versión 14.0 es la primera que incluye posibilidades de visualización 3D mientras que, conforme Rockwell (2016) la versión v15 es un producto desarrollado en 64 bit (a diferencia de la mayoría de otros productos comerciales que son soluciones para 32 bit) “*lo que significa que ARENA puede utilizar una cantidad de memoria significativamente mayor de los 2 GB de las versiones 32 bit*” y que “*los usuarios pueden construir modelos significativamente más grandes y resolver un número de problemas que previamente no era posible abordar con simulación DES*”

De igual modo y tal como describe Zupick (2016), con el software *ARENA* no sólo se pueden resolver problemas DES sino también aquellos bajo formulación *ABS*, ya que como defiende esta autora tomando las conclusiones de Law (2015) los modelos *ABS* no dejan de ser un caso especial de los modelos *DES* y formularlos con uno u otro paradigma no es cuestión de la herramienta o software que se elige, sino de cómo se formula el propio problema. De hecho, Rockwell (2016) describe con detalle nuevas utilidades de la versión *ARENA v15* dentro del campo de simulación *ABS*.

Como elemento relevante dentro del alcance específico de este trabajo cabe destacar que este software presenta desarrollos y soluciones industriales específicas para numerosos campos (fabricación y manufactura, industria alimenticia, minería, *retail*, logística y cadena de suministro, salud, comunicación y *call centers*, empaquetado, servicio al cliente, ...) destacando uno concreto para la planificación de puertos y terminales marítimas y que se describe en *ARENA* (2016).

1.3.3.4.2.2 *ExtendSIM®*.

Tal y como puede consultarse en la página web de la empresa responsable de su desarrollo y comercialización (*Image That Inc.*), los orígenes de *ExtendSIM®* se remontan a 1987 cuando se

lanza la primera versión para trabajos en entornos Macintosh bajo el nombre *Extend 1.0* y con capacidad de modelización en entornos continuos (EXTENDSIM, 2016)).

La evolución de este sistema es relativamente rápida como se describe en Krah1 (2012) que data la verisión *Extend 1.1* en el año 1989 (ITInc, 1989), la versión *Extend 2.0* tan sólo tres años después (ITInc, 1992) y a la que siguieron versiones denominadas *Extend 3.x* (ITInc, 1995) y de ahí las versiones *Extend 5.0* (ITInc, 2001), *Extend 6.0.8* (lanzada en marzo de 2007), *ExtendSim 7.x* (ITInc, 2007) con un último evolutivo *Extend 6.0.8* que vio la luz en noviembre de 2009 y la versión 8 cuya última version *ExtendSim 8.0.2* data de agosto de 2011 (ExtendSim, 2017).

Dos hitos son relevantes en la historia de este simulador. Primero cuando en 1990 se añaden capacidades de simulación bajo paradigma DES y, segundo y aún más relevante, cuando en 1995 se lanza la versión 3.1 para Windows (hecho que hace que su utilización se multiplica).

En la actualidad y tras varias evoluciones, este software comercial se encuentra en versión 9.2 (lanzado en febrero de 2015) y ofrece cuatro posibles paquetes: *ExtendSim CP* (“*Continuos Processes*” ideada como dice su nombre para procesos continuos), *ExtendSim OR* (“*Operational Research*” que incluye evoluciones para eventos discretos), *ExtendSim AT* (“*Advance Technology*” en el que se añaden ratios discretos (“*Discrete Rates*”⁹⁴) y otro número de herramientas de modelización avanzado⁹⁵ y *ExtendSim Suite* (que incluye interfaces de animación 3D que ayudan a la difusión amistosa de resultados).

Este software también ha visto muy extendido su utilización en el campo científico al tratarse de una plataforma de simulación multipropósito que permite un ambiente amplio de ejercicios de simulación tanto en el campo de simulación dinámica y continua, como de eventos discretos, ratios discretos, ABS, integración y modelización lineal y no lineal y sistemas *mixed-mode*.

Como referencias más modernas de análisis de esta herramienta se puede citar a Diamond *et al.* (2010) y Krah1 y Nastasi (2014). En fechas más recientes y sin que esté disponible a la fecha de redacción de este apartado más que los resúmenes de su trabajo, Nastasi (2016a) ha analizado el impacto de *ExtendSIM* en la industria, mientras que Nastasi (2016b) ha analizado las innovaciones introducidas con las soluciones de *ExtendSIM* en relación a otros paquetes comerciales y que, en gran medida basa en la flexibilidad del sistema.

1.3.3.4.2.3 *Taylor II* y *Enterprise Dynamics (ED)*.

⁹⁴ Los “*ratios discretos*” es un sistema intermedio entre los sistemas discretos y continuos.

⁹⁵ La funcionalidad soportando *ratios discretos* es incluida en el lanzamiento de la versión 2008 de este software.

Este es un software de simulación que tiene sus orígenes en los años 1990, cuando la empresa *Taylor Enterprise Dynamics* (en adelante TED) lanza la versión 1.0 de este paquete de simulación (conocida simplemente como *Taylor Enterprise Dynamics\TED*).

Sucesivas evoluciones del sistema son presentadas por sus desarrolladores en los WSC de los años 1993, 1994, 1996, 1998 y 1999 en trabajos de Hille y Warner (1993), Nordgren (1994), King (1996), Nordgren (1998) y Hullinger (1999).

Taylor II se lanza directamente sobre Windows y se basa en un desarrollo previo conocido como *Taylor* (o *Taylor I*), desarrollado por *F&H Simulations B.V.* (nombre original con el que se fundó la compañía y que más tarde cambiaría de razón social a TED) a partir del año 1986.

Nuevos desarrollos se han apoyado en este software, como el *Taylor ED* de 1998 (versión 2.0 de *Taylor II* lanzada por TED y en el que se incluía por primera vez un simulador orientado a objetos con funcionalidades 3D).

En el año 2000 la compañía de consultoría y distribución de software *Incontrol Business Engineers* adquieren *F&H Simulations* generándose una nueva compañía conocida como *Incontrol Simulation Solutions*, empresa que desde entonces se ha encargado del desarrollo de esta plataforma de simulación⁹⁶.

Las nuevas versiones lanzadas por esta empresa a partir del año 2003 pasan a denominarse directamente *Enterprise Dynamics* o *ED*, siendo la versión lanzada en el año 2003 la 6.0 del antiguo Taylor – II y en la actualidad estando en versión 10 (versión lanzada en octubre 2016)⁹⁷.

En la tabla 3 se presenta la evolución del programa Taylor con objeto de tener una perspectiva de evolución de este simulador, se numeran diferentes versiones de este software de elaboración propia y construida con la información que proporciona la empresa que lo desarrolla en su propia página web.

⁹⁶ Los antiguos responsables de *F&H Simulations* constituyen una empresa llamada *Flexsim Software Products, Inc.* y desarrollan otro paquete comercial conocido como *Flexsim* que es objeto de otro epígrafe en la presente sección.

⁹⁷ INCONTROL (2016).

Tabla 3. Evolución del programa Taylor ®.

Version	Nombre delCodigo	Fecha Lanzamiento
1.0	Taylor Enterprise Dynamics\TED	1997
2.0	Taylor ED	1998
2.3	-	Nov. 1999
3.0	Taylor ED 2000	Jun.2000
3.2	-	
3.3	-	
3.4	-	Jun. 2001
4.0	Taylor ED – 4	Dic. 2001
5.0	-	
6.0	Enterprise Dynamics 6	Oct. 2003
6.1	-	Ener 2004
6.2	-	Mar. 2004
6.3	-	Jul. 2004
7.0	Enterprise Dynamics 7	Abril 2006
7.1	-	Sep. 2006
7.2	-	Dic. 2007
8.0	Enterprise Dynamics 8	Abril 2009
8.1	-	Mayo 2010
8.2	-	Mayo 2011
8.2.5	-	Marzo 2012
9.0	Enterprise Dynamics	Enero 2014
10.0	Enterprise Dynamics	Octubre 2016

Fuente: Elaboración propia.

En el contexto de esta tesis doctoral, es importante mencionar que esta empresa ha desarrollado un modelo de propósito especial específicamente diseñado para la gestión de terminales de contenedores que se conoce bajo el nombre de Enterprise Dynamics (ED) – Container Terminal.

1.3.3.4.2.4 Visual SLAM / Awesim.

Como ya se ha avanzado en el apartado 1.2.6, uno de los investigadores más influyentes en el desarrollo de la simulación tal y como hoy se la conoce es el premio nobel A. Pritsker, quien impulsó el desarrollo de *SIMSCRIPT* para avanzar más tarde con el lanzamiento de *SLAM*.

Tras estos primeros lenguajes de simulación, se decide a realizar un simulador con los que generar códigos *SLAM* de una manera sencilla acercando la simulación a un público más amplio. Este paquete conjunto se pasa a denominar *Visual SLAM – AweSIM*.

En efecto, *AweSIM* utiliza las capacidades del lenguaje *SLAM* pero transportándolas a un entorno visual más amigable que lo hace más accesible a no expertos programadores. Se considera siempre de una manera combinada en el que un lenguaje de simulación propiamente dicho (*Visual SLAM*) trabaja con un entorno de simulación *AweSIM*.

Este sistema es descrito en O'Reilly y Lilegdon (1999) y Pristsker y O'Reilly (1999) para quienes la gran ventaja de este simulador combinado es su gran flexibilidad.

Efectivamente es un desarrollo posterior del lenguaje de programación *SLAM-II (Visual Slam)* que, acoplado con un entorno de simulación a su vez construido sobre *Visual Basic* y *C++ (AweSIM)*, permite incorporarlo fácilmente en su arquitectura de tal modo que se le pueden añadir fácilmente desarrollos realizados en estos lenguajes de programación, cualidad que comparte con *ARENA*.

Este software empezó a comercializarse por la empresa del propio A. Prirtsker (*Pritsker Corporation*) en 1996, y tras una primera versión en 1996 apareció en 1997 la versión 2.0. Sin embargo, el software fue adquirido por la empresa *Symix Systems, Inc* quien lo hizo evolucionar hasta versión 3.0 (lanzada en 2003) para más tarde abandonar el proyecto y dejar de invertir en su evolución.

Aún cuando el mismo ha caído en desuso por haber sido discontinuado por sus desarrolladores, se destaca aquí porque el mismo ha encontrado ciertas aplicaciones en planificación portuaria que conviene señalar y porque su uso legal no estaba sujeto a licencia de instalación y fue muy extendido en docencia y en investigación.

1.3.3.4.2.5 *SIMIO®*.

Este es un simulador de eventos discretos relativamente moderno que fue presentado por su creador C. Dennis Pegden en la WSC de 2007 (Pegden, 2007) y cuya primera versión comercial fue lanzada en mayo de 2009 por la empresa *SIMILIO LCC* (Pittsburgh, Pensilvania, Estados Unidos)⁹⁸, fundada y dirigida por el propio C.D. Pegden, creador también del lenguaje de simulación *SIMAN* y antes co-creador junto A. Pritsker de *SLAM*, siendo considerado como otro de los padres de la simulación moderna.

Mientras que *SIMAN* y *SLAM* fueron comercializadas por *Pritsker Corporation*, C.D. Pegden fundó *Systems Modeling Corporation* ("SMC") que han sido los desarrolladores de *ARENA®* hasta que sus activos fueron comprados por *Rockwell Automation*.

Por tanto, la experiencia de Pegden liderando la creación de la familia de aplicaciones *SIMAN* y *ARENA®*, se vuelca en este nuevo producto (Pegden y Sturrock, 2013)

Por su reciente fecha de lanzamiento de *SIMIO®*, es un simulador que tiene aún un recorrido temporal limitado si se compara con otros. Sin embargo, es un sistema a los que sus responsables

98 *SIMIO* (2010) y *SIMIO* (2017a)

han hecho evolucionar de una manera muy rápida con una versión cada año, estando desde abril de 2017 en versión 10.1.0 (SIMIO, 2017b).

Además, tal y como se puede observar en SIMIO (2016), también cuenta con su propia extensión para terminales y puertos a modo de un auténtico modelo de propósito especial. Por lo tanto, y a pesar de su “juventud”, la existencia de software de aplicación específica y la garantía histórica y solvencia técnica que dan sus desarrolladores hacen que se considere esta herramienta como de alto potencial de utilización futura.

1.3.3.4.2.6 FLEXSIM® (FLEXible SIMulation).

Erol Gelenbe (actualmente profesor del departamento de electrónica Imperial Collage de Londres (Reino Unido) y Hatim Guennouni (investigador de la facultad de informática de la Escuela de Rene Descartes de París, Francia) figuran como pioneros del primero simulador FLEXIM que tiene sus orígenes al año 1988. El primer manual de usuario aparece referenciado en Guennouni (1989) y poco más tarde Gelenbe y Guennouni (1991) ofrecen una explicación sobre el sistema. Estos autores lo presentan como un simulador de propósito específico dentro de determinados sistemas de producción y manufactura y ceñido a su utilización en entornos UNIX. Más tarde *Flexsim Software Products, Inc.* ha contribuido al desarrollo de FLEXIM® tal y como lo hoy se la conoce.

Numerosos investigadores han presentado sucesivos desarrollos, manuales de utilización o estudiado su aplicabilidad en campos específicos. Entre ellos se puede citar en orden cronológico Nordgren (2002, 2003), Beaverstock *et al.* (2011), Lavery *et al.* (2011) y la propia página web del desarrollador que se ha referenciado en FLEXSIM (2016a) y FLEXSIM (2016b) para la herramienta de carácter general y FLEXTERM (2016 y 2017) para el desarrollo específico para terminales de contenedores.

FLEXIM® es una aplicación que utiliza programación orientada a objetos que está integrada completamente en el lenguaje de programación C++ y que, si bien según la página web de la empresa comercializadora ha sido desarrollada por *Flexsim Software Products, Inc.*, a partir de 1993, la misma ya había sido presentado en el WSC de 1992 por Nordgren (2002).

Efectivamente, a parte de estos orígenes de principios de los años 90, FLEXSIM 1.0 (como evolución del software que hoy conocemos) fue creado en 2002 pero lanzado comercialmente en febrero de 2003.

Este software en diciembre de 2016 lanzó su versión 17.0.0 habiéndose lanzado dos actualizaciones a lo largo de 2017 (FLEXIM 2017).

Según FLEXSIM (2016b), *Flexsim Software Products, Inc.*, es una empresa que constituyen los antiguos responsables de *F&H Simulations, Inc.*, que como se ha visto con anterioridad fue la

compañía que se encargó de desarrollar el lenguaje de simulación Taylor, y fue fundada y dirigida desde los orígenes por William B. Nordgren (quien a su vez había sido fundador de *PROMODEL* Corporation, simulador del que se hablará con posterioridad).

Tal y como se recoge en FLEXIM (2016a), esta herramienta incluye una familia de aplicaciones como son: *FLEXIM GP*® (simulación de propósito general), *FLEXIM Fabmodeler*® (especializada en la industria de semiconductores), *FLEXIM SANS*® (simulación de sistemas de almacenamiento y redes de acceso compartido), *FLEXIM Healthcare Simulation*®, *FLEXIM HC*® (campo de las ciencias de la salud), etc. y es que, efectivamente, *FLEXSIM*® ha desarrollado simuladores de propósito específico para muchos sectores entre los que se podrían citar el de la minería, las manufacturas, logística y distribución, educación y sanidad pero, obviamente, con mucho más interés para este trabajo, para la aplicación a puertos y terminales.

Efectivamente, de estas aplicaciones se debe de destacar finalmente y, sobre todo, teniendo en cuenta el objeto de esta tesis, *FLEXTERM*®⁹⁹. Se trata de una aplicación para puertos en el que el usuario puede recrear tanto el patio de almacenamiento y su equipamiento, como el muelle y sus grúas y los accesos (carretera y ferrocarril) reportando tanto estadísticos de operación como recrear una animación 3D¹⁰⁰. Este sistema cuenta con bibliotecas específicamente diseñadas para soportar los procesos y gráficos de una terminal de estas características. Más adelante se volverá sobre ello.

En lo que se refiere a esta última aplicación portuaria, la última versión de esta aplicación portuaria es la *FLEXTERM 17.0.1*, lanzada sobre la versión 2017.1.2 de FlexSim en agosto 2017¹⁰¹.

1.3.3.4.2.7 *PROMODEL* (previamente *ProMod*).

Este es otro software de simulación desarrollado por la empresa *Promodel Corporation*, fundada en 1988, por William B. Nordgren y Charles Harrell. Seguramente, este simulador fue el primero con propósitos comerciales en incorporar animación gráfica y trabajar sobre Microsoft Windows e incorporar aplicaciones de optimización en los modelos de simulación.

Sus creadores se basaron en los trabajos previos que había desarrollado uno de sus fundadores (Charles Harrell) como ingeniero de producción de Ford Motor Company y donde había desarrollado en 1976, tal como ya se ha comentado, un modelo para optimizar las líneas de producción de la compañía que se denominó *GENTLE* (*GEN*eral *TR*ansfer *L*ine *E*mulator) y que se cita aquí sólo como referencia histórica de *PROMODEL* ya que se trataba de un modelo de

⁹⁹ Simulador de terminales portuarias que originalmente fue llamado *FLEXIM TC*® puesto que estaba centrada en las terminales de contenedores. Hoy en día soporta todo tipo de entornos portuarios.

¹⁰⁰ Para el módulo de puertos y terminales puede visitarse la página web del producto (FLEXTER, 2016).

¹⁰¹ FLEXTERM (2017)

propósito específico con muy poca flexibilidad y solo aplicable para el propósito que había sido concebido y que se ha señalado más arriba.

Esta empresa también ha desarrollado un software específico para entornos portuarios que comercializan bajo el paraguas de *SIMULART* pudiendo encontrar más información en *SIMULART* (2013).

1.4 Conclusiones y descripción histórica de herramientas de simulación.

A lo largo de los apartados anteriores se han revisado algunas de las herramientas de simulación (lenguajes o simuladores) más conocidas. Sin embargo, el número de aplicaciones, versiones y variantes es muy significativo.

En la tabla 4 se presentan los paquetes comerciales de simulación basándose en los trabajos previos de Banks (1995) y Maria (1997) autores que realizan una primera compilación, y sobre la que se han realizado ciertas tareas de actualización y mejora en esta tesis doctoral. En la tabla se distingue entre lenguajes de simulación y paquetes de simulación pero no se debe de dejar de indicar que muchas veces la frontera que separa ambos grupos no está perfectamente definida y resulta más académica que práctica.

Tabla 4. Paquetes comerciales de simulación.

Tipo de paquete de simulación	Ejemplos
Lenguajes de simulación	<i>SIMAN</i> <i>SLAM</i> <i>EXTEND</i> <i>GPSS</i> <i>Micro SAINT</i> <i>SIMSCRIPT</i> <i>SLX</i> <i>MODSIM III</i> <i>SIMPLE ++</i> ,...

Tipo de paquete de simulación	Ejemplos
Paquetes de simulación - AOS (<i>application-oriented simulator</i>)	ARENA (<i>evolución de SIMAN</i>) AweSIM (<i>evolución de SLAM II</i>) AUTOMOD, Extend+MGF, FACTOR/AIM, ManSim/X, MP\$IM. PROMODEL. QUEST. TAYLOR II. Witness. COMNET III. NETWORK II.5. OPNET Modeler. OPNET Planer. SES/Strategizer SES/wordbench. BP\$IM, Extend+BPR. ProcessMODEL ServiceMODEL. SIMPROCESS Time machine. SIMIO MedModel,...

Fuente: María (1997) con actualización y ampliación de elaboración propia.

Un interesante y más contemporáneo trabajo de recopilación de paquetes comerciales de simulación existentes y de los campos de aplicación a los que se refieren es el realizado por Abu-Taieh y El Sheikh (2007), quienes a la fecha de la publicación de su trabajo identificaron un total de 47 herramientas distintas.

Estos autores analizan las características de todos ellos a través de la información comercial proporcionada por sus desarrolladores a través de sus páginas web enmarcando cada una de estas aplicaciones descritas en un total de 19 campos de aplicación distintos (redes de comunicación, gestión de cadenas de suministro, construcción, sistemas de transporte, etc.).

En base a las referencias de dichos autores se ha confeccionado una tabla de doble entrada (tabla 5) en la que en filas se incluye el paquete comercial de simulación analizado y en columnas los campos de aplicación; destacando como conclusión que, de acuerdo con dichos autores, el campo de aplicación que más desarrollos ha atraído ha sido, sin duda, el de manufactura y fabricación industrial (18 paquetes distintos), seguido muy de lejos por el de redes de comunicación y computación, logística y cadena de suministro y redes de transporte (estos tres últimos con 9 paquetes comerciales disponibles).

Desde el punto de vista de flexibilidad, el paquete más extendido (en lo que se refiere al número de aplicaciones o campos que cubre y no necesariamente al número de usuarios o licencias

comercializadas) sería el *Visual Simulation Environment*¹⁰² (10 campos de aplicación), seguido de *Analytica*¹⁰³ y *Experfit*¹⁰⁴ (ambos con 7 campos de aplicación).

Cabe, también, mencionar que en el marco de la investigación de Abu-Taieh y El Sheikh (2007) y dentro del campo de sistemas de transporte (en el que podría estar incluida la gestión de puertos), los autores describen 9 paquetes comerciales como serían: *AnyLogic 5.0*, *AutoMod*, *Berkeley Madonna*TM, *ExpertFit*, *NAG SMP Library*, *SLIM*, *VisSim*, *Visual Simulation Environment* y *Witness*.

Refiriéndose al campo de la cadena de suministro (también con aplicaciones portuarias evidentes) los autores citarían los siguientes paquetes comerciales: *AnyLogic 5.0*, *Arena*, *Flexsim*, *MAST*, *Process Industry Manufacturing Scheduling System (PIMSS)*, *SAS Software*, *SLIM*, *Supply Chain Builder* y *Visual Simulation Environment*.

De igual modo, y sin restar valor al trabajo realizado por estos últimos autores, cabe destacar que los paquetes de simulación analizados por los mismos, si bien amplio (47), no incluyen otros que si han sido recogidos por Banks (1995) y Maria (1997) por lo que estas referencias bibliográficas deben revisarse de una manera complementaria para tener una visión más completa del universo de aplicaciones disponibles.

En total se han encontrado 17 simuladores analizados por Maria (1997) y no por Abu-Taieh y El Sheikh (2007). A saber: *Automod*, , *BP\$IM*, *FACTOR/AIM*, *ManSim/X*, *MP\$IM*, *Promodel*, *QUEST*, *Taylor II*, *COMNET III*, *edModel*, *NETWORK II.5*, *OPNET Modeler*, *ES/Strategizer*, *SES/wordbench*, *ProcessModel*, *erviceModel*, *SIMPROCESS* y *Time machine*.

Sin duda, de la conjunción de ambos análisis e investigaciones se puede rápidamente concluir el gran número de posibilidades comerciales que se pueden encontrar para abordar un problema de simulación y con ello la necesidad de estudiar bien las características del sistema que se quiera modelar y cual, de todos ellos, se ajusta más a nuestras necesidades.

A continuación se incluye la tabla que se acaba de citar en la que se recopilado un total de 47 aplicaciones (mostradas en filas) y 19 sectores (computados en columnas) que resulta de ampliar los estudios realizados de Abu-Taieh y El Sheikh (2007) y donde para entender la tabla es necesario presentar primero el código empleado para cada uno de los sectores:

1. Redes de computadores y comunicaciones.

¹⁰² Una descripción detallada de este modelo puede ser consultado en Balci *et al.* (1998).

¹⁰³ *Analytica* un paquete de simulación visual desarrollado por *Lumina Decision Systems* usado, para “crear, analizar y comunicar modelos de decisión cuantitativa” (Wikipedia *Analytica*, 2016) y como una herramienta para manejar “la incertidumbre y realizar análisis” (Katalin, 1990).

¹⁰⁴ Law y McComas (1996) presentan *ExpertFIT* dentro del WSC de 1996 definiéndolo como un sistema de simulación basado en Windows que en realidad en la evolución de un software anterior denominado *UniFIT-II*.

2. Evaluación del rendimiento de computadores.
3. Educación y formación.
4. Sistemas de cuidado de la salud.
5. Sistemas de manufactura y fabricación industrial.
6. Aplicaciones militares y sistemas de combate.
7. Tráfico aéreo y control aeroespacial.
8. Sistemas de Servicios.
9. Cadena de suministro.
10. Sistema de transportes.
11. Aeroespacial.
12. Sector del gas y petróleo.
13. Construcción.
14. Modelización financiera.
15. Logística, paquetería, mensajería/envíos postales ("*parcels & parcel handling, queue*").
16. Eliminación de constricciones y cuellos de Botella ("*De-bottlenecking*").
17. Escenarios "What if".
18. Robótica y sistemas mecánicos.
19. Análisis de decisión y riesgos.

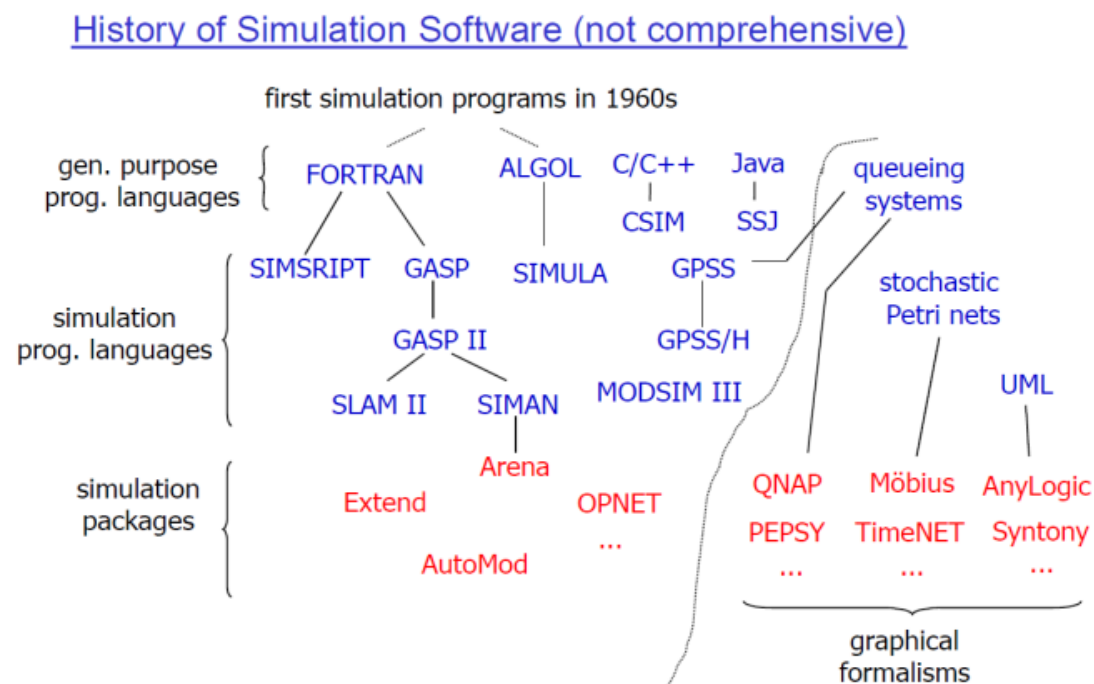
Tabla 5. Uso de paquetes de simulación en diferentes campos de actividad.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL
1 <i>Analytica</i>					X			X			X	X	X	X					X	7
2 <i>AnyLogic 5.0</i>	X	X	X			X			X	X										6
3 <i>Arena</i>								X	X								X			3
4 <i>AutoMod</i>				X	X					X	X				X					5
5 <i>AweSim</i>	X																			1
6 <i>Ball Standard Edition& Professional Edition</i>																			X	1
7 <i>Berkeley Madonna™</i>										X										1
8 <i>Crystal</i>																			X	1
9 <i>DecisionPro</i>														X					X	2
10 <i>DecisionScript</i>														X						1
11 <i>Design II simulation Package</i>												X	X							2
12 <i>Dymola</i>																		X		1
13 <i>eM-Plant</i>																X				1
14 <i>Enterprise Dynamics</i>															X					1
15 <i>ExpertFit</i>	X			X	X	X		X		X					X					7
16 <i>Extend</i>															X					1
17 <i>Factory Explorer</i>					X											X				2
18 <i>Flexsim</i>					X				X											2
19 <i>GAUSS</i>														X						1
20 <i>GoldSim</i>					X															1
21 <i>GPSS World for Windows</i>	X				X															2
22 <i>Manufacturing Scheduling System (PIMSS)</i>					X															1
23 <i>MAST</i>					X				X											2
24 <i>MICROSAINT</i>				X	X	X														3
25 <i>NAG C Library</i>											X									1
26 <i>NAG SMP Library</i>			X	X	X	X				X		X		X						7
27 <i>Optsim (Artifex)</i>	X																			1
28 <i>PASION</i>			X																	1
29 <i>Process Industry</i>					X															1
30 <i>Process Industry Manufacturing Scheduling System (PIMSS)</i>					X				X											1
31 <i>Proplanner Manufacturing Process Management Software</i>					X															1
32 <i>QX3D</i>																		X		1
33 <i>Resource Manager</i>					X												X			2
34 <i>SAS Software</i>	X								X						X					3
35 <i>ShowFlow</i>																X				1
36 <i>SIGMA</i>				X	X			X												3
37 <i>SimCAD Pro</i>					X										X			X		3
38 <i>SIMUL8</i>																X	X			2
39 <i>Simulation System</i>			X																	1
40 <i>SLIM</i>	X								X	X										3
41 <i>STARDIS</i>						X														1
42 <i>STELLA / ithink</i>			X																	1
43 <i>Supply Chain Builder</i>									X											1
44 <i>VisSim</i>	X									X										2
45 <i>Visual Simulation Environment</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										10
46 <i>WebGPSS (micro-GPSS)</i>			X																	1
47 <i>Witness</i>										X		X								2
TOTAL	9	2	7	6	18	6	1	5	9	9	3	4	2	5	6	4	3	3	4	

Fuente: Elaboración propia ampliando las referencias de Abu-Taieh y El Sheikh (2007).

Como resumen de todo lo expuesto se incorpora un esquema (ilustración 9) donde se observa la evolución de los principales lenguajes y paquetes de simulación presentado por el Departamento de Ciencias Computacionales de la Friedrich – Alexander Universitat (Erlangen – Nürnberg) y que se recoge en Hielscher (2011).

Ilustración 9. Historia de simulación.



Fuente: Hielscher (2011).

Bibliografía.

1. Abu-Taieh, E.M.O. y El Sheikh, A.A.R. (2007). *Commercial simulation packages: A comparative study*". International Journal of Simulation, vol 8(2): 66-76. Disponible en [fecha de último acceso 17-11-2017] <http://www.rbcsimulations.com/wp-content/uploads/2011/12/Comparative-Study-Simulation-Softwares.pdf>.
2. Agesen, O.; Frølund, S. y Olsen M.H. (1990). *Persistent and Shared Objects in BETA*. Technical Report IR-89, Computer Science Department, Aarhus University.
3. Allan, R. (2010). *Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools*. Computational Science and Engineering Department, Version 1.1. STFC Daresbury Laboratory, Daresbury, Warrington WA4 4AD. Disponible en [fecha de última consulta el 07/01/2017] <http://www.grids.ac.uk/Complex/ABMS/>
4. Allen, T. (2011). *Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling: Voting Systems, Health Care, Military, and Manufacturing*. Springer - Edición: 2011. 228 páginas. ISBN-10: 0857291386. ISBN-13: 978-0857291387.
5. Altioik, T. y Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Elsevier, Inc., 456 páginas ISBN 978-0-12-370523-5. e-Book, ISBN 9780080548951.
6. Andersen, P.; Bak L.; Brandt, S.; Knudsen J.L.; Madsen, O.L.; Møller, K.J.; Nørgaard C. y Sandvad E. (n/a). [fecha de ultimo acceso 01-07-2016]. *The Mjølner BETA system*. Disponible en <http://daimi.au.dk/~beta/Papers/MBSoverview/MBSoverview.pdf>
7. ARENA (2016). *ARENA Port Terminal Simulation Software*. Rockwell Automation© ARENA Simulation Software. [Fecha de ultimo acceso 13-08-2016]: Disponible en [fecha de última consulta 15-10-2016] <https://www.arenasimulation.com/industry-solutions/port-terminal-simulation-software>.
8. Averill, M.L y Larmey, C.S. (2002). *An Introduction to Simulation- Using SIMSCRIPT II.5*. Copyright © 1984, 2002 Averill M. Law and CACI, INC.-Federal. CACI Products Company. San Diego, California (Estados Unidos). 164 páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 08-07-2016] http://www.caciasl.com/cust_center/ss3docs/SimscriptSimplified.pdf
9. Balanger, R. (1990). *MODSIM II. A modular, objet-oriented language*. Proceedings of the 22nd Winter Simulation Conference. IEEE Computer Society Washington, DC, Estados Unidos ©1991. Editado por O. Balci, R.P. Sadowski y R.E. Nance; pp:118-122 Disponible

-
- en [fecha de última consulta el 23-08-2016] http://informs-sim.org/wsc90papers/1990_0021.pdf
10. Balanger, R. y Mullarney, A. (1990). *MODSIM II Tutorial*. CACI Productu Co. La Jolla CA.
 11. Balanger, R.; Donovan B.; Morse, K y Rockower D. (1990). *MODSIM II Reference Manual*. CACI Productu Co. La Jolla CA.
 12. Balci, O.; Bertelrud, A.I. y Esterbrook C.M. (1998). *Visual Simulation Enviroment*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference (editado por D. J.Medeiros, E.Watson, J. Carson, and M. S. Manivannan. (1998). Disponible en [fecha de último acceso 17-06-2016] <http://www.acm-sigsim-mskr.org/Courseware/Balci/Docs/VSEtutorial.pdf>
 13. Banks, J.; Carson J. y S y J. (1995). *Getting Started With GPSS/H*". Second Edition. Wolverine Software Corporation.
 14. Banks, J. (1995). *Software Simulation*. Proceedings of the Winter Simulation Conference 1995. (ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W.R.Ligegdon y D. Goldsman). (pp: 32- 38). Disponible en [fecha de acceso el 12-01-2017] http://www.informs-sim.org/wsc95papers/1995_0005.pdf
 15. Banks, J.; Carson, J.S.; Nelson, B.L. y Nicol, D.M. (2009). *Discrete-Event System Simulation*. (5th Edition) Prentice Hall (ISBN-13: 978-0-13-606212-7; ISBN-10: 0-13-606212-1).
 16. Beaverstock, M.; Greenwood, A.; Lavery, E. y Nordgren, W. (2011). *Applied Simulation Modeling and Analysis using FlexSim*. 2nd edition. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem, UT 84097 USA. 438 páginas. ISBN: 0983231915.
 17. Behdani, B. (2012). *Evaluation of Paradigms for Modeling Supply Chains as Complex Socio-Technical Systems*. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (editado por C. Laroque, J. Himmelspace, R. Pasupathy, O. Rose, and A.M. Uhrmacher). Disponible en (fecha de última consulta 15/10/2016) en https://www.academia.edu/1523272/Evaluation_of_Paradigms_for_Modeling_Supply_Chains_as_Complex_Socio-Technical_Systems
 18. Birtwistle, G.M.; Dahl, O. J.; Myhrhaug B. y Nygaard K. (1973). *SIMULA Begin*. Philadelphia. Auerback Publishers Inc. Consultado en revisión de Birtwistle, G.M (1979). Editado por Van Nostrand Reinhold (5 de junio 1979). 480 páginas ISBN-10: 0884050327 / ISBN-13: 978-0884050322.

-
19. Birtwistle, G. M. (1979). *DEMOS: A system for discrete event simulation on Simula*. London: McMillan. Consultado en School of Computer Science, University of Sheffield, G. Birtwistle. 238 páginas. Disponible en [fecha de último acceso 19-10-2016] <http://staffwww.dcs.shef.ac.uk/people/G.Birtwistle/research/demos.pdf>
 20. Bobillier, P. A.; Kahan, B. C. y Probst A. R. (1976). *Simulation with GPSS and GPSS V*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. (1ª edición 1 de noviembre de 1976). 495 paginas. ISBN-10: 0138105499 / ISBN-13: 978-0138105495.
 21. Bonini, C. P. (1963). *Simulation in information and decision systems in the firm*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. (Ford Foundation doctoral dissertation series) 178 paginas ISBN: 9781258233969
 22. Born, R. y Ståhl, I. (2004). *WebGPSS: The first two hours of simulation education*. Simulation Conference, 2004. Proceedings of the 2004, vol. 2, pp: 2066–2074. Editado por R. G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, y B. A. Peters. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 23-07-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc04papers/277.pdf>
 23. Born, R. y Ståhl, I. (2008). *A business course in simulation modeling*. Issues in Information Systems, vol. IX, nº 1, pp: 6-15. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 23-11-2016] http://iacis.org/iis/2008/S2008_887.pdf
 24. Borshchev, A. y Filippov, A. (2004). *From System Dynamics and Discrete Event to practical Agent Based Modelling: Reasons, Techniques, Tools*. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Oxford (England). Disponible en [fecha de último acceso 22/10/2016] <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/systemdyndiscreteeventabmcompared.borshchevfili ppov04.pdf> y http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004/PAPERS/381BORSH.pdf
 25. Brailsford, S. y Hilton, N. (2001). *A comparison of discrete event simulation and system dynamics for modelling health care systems*. Texto de Planning for the Future: Health Service Quality and Emergency Accessibility. Operational Research Applied to Health Services (ORAHS). Editor Riley, J., editor. Glasgow Caledonian University (2001). Disponible en [fecha de última consulta 04-10-2016] <http://core.ac.uk/download/files/34/30381.pdf>.
 26. Brailsford, S.; Desai, S. y Viana, J. (2010). *Towards the holy grail: Combining system dynamics and discrete-event simulation in healthcare*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, y

-
- E. Yücesan (pp: 2293-2303). Disponible en [fecha de último acceso 01.05.2017] http://eprints.soton.ac.uk/206555/1/Brailsford_Desai_and_Viana.pdf
27. Brailsford, S. (2012). *Discrete-event simulation is alive and kicking*. Proceedings Operational Research Society Simulation Workshop 2012 (SW12). Accesibe en (fecha de última consulta el 05/06/2015) en <http://www.theorsociety.com/Pages/ImagesAndDocuments/documents/Conferences/SW12/Papers/Brailsford.pdf>
 28. Brandt, S. y Madsen, O.L. (2016). *Object-Oriented Distributed Programming in BETA – Abstract*. Computer Science Department, Aarhus University. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] en <http://daimi.au.dk/~beta/Papers/OODP/oodp.abstract.html>
 29. Bray, R.L. y Mendelson, H. (2012). *Information transmission and the bullwhip effect: An empirical investigation*. Management Science vol. 58 nº 5, pp: 860-875. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.1110.1467?journalCode=mnsc>
 30. Bryan, O.F. Jr. (1989). *MODSIM II—an object oriented simulation language for sequential and parallel processors*. Proceedings of the 21st Winter Simulation Conference, páginas 172-177. ACM New York, NY, USA ©1989. ISBN: 0-911801-58-8 / [doi>10.1145/76738.76758](https://doi.org/10.1145/76738.76758)
 31. Buffa, S.E.; Armout, G.C. y Vollmann, T.E. (1964). *Allocating Facilitites with CRAFT*. Harvard Business Review, March-April 1964, 136
 32. CACI (1988). *SIMSCRIPT II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, USA). Diponible en [fecha de último acceso el 03-11-2016] http://www.caciasl.com/cust_center/ss3docs/simprog.pdf
 33. CACI (1990). *SIMFACTORY II-5. User's Manual*. CACI Products Co. La Jolla (California, USA).
 34. CACI (1991a). *A quick look at NETWORK II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, USA).
 35. CACI (1991b). *A quick look at LANNET II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, USA).
 36. CACI (1991c). *A quick look at COMNET II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, USA).

-
37. CACI (1996). *MODSIM III: The language for object-oriented programming*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (USA).
 38. CACI (2007). *SIMSCRIPT III* © – *Users Manual*. Copyright © 1984, 2002 Averill M. Law and CACI, INC.-Federal. CACI Products Company. San Diego, California (USA). 160 páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 08-07-2016] http://www.simscrip.com/cust_center/sim3r2docs/SIMSCRIPTIII_User_Manual.pdf
 39. CACI (2011a). *History of SIMSCRIPT*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (USA). Disponible en [fecha de última consulta 12-07-2016] <http://www.simscrip.com/partners/partners.html>
 40. CACI (2011b). *SIMSCRIPT III: Object-Oriented, Modular, Integrated software development tool*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (USA). Disponible en [fecha de última consulta 12-07-2016] <http://www.simscrip.com/products/products.html>.
 41. Cannella S. y Ciancimino, E. (2010). *On the bullwhip avoidance phase: supply chain collaboration and order smoothing*. International Journal of Production Research, vol. 48, n° 22, pp: 6739-6776. Disponible en [fecha de última consulta 12.12.2016] <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207540903252308?scroll=top&needAccess=true>
 42. Cellier, F. y Blitz A.E. (1976). *GASP V Simulation: A universal simulation package*. Proceedings of the IFAC Conference. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 22-01-2017] https://www.researchgate.net/publication/242584336_GASP-V-A_universal_simulation_package
 43. Chan, W.; Son, Y.-J. y Macal, C. (2010). *Agent-based simulation tutorial - simulation of emergent behavior and differences between agent-based simulation and discrete-event simulation*. En Simulation Conference (WSC), Proceedings of Winter Simulation Conference 2010, páginas 135 -150. Disponible en [fecha de última cosulta 01.05.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/014.pdf>
 44. Chen, Y. F.; Drezner, Z.; Ryan, J.K. y Simchi-Levi, D (1998). *The Bullwhip Effect: Managerial Insights on the Impact of Forecasting and Information on Variability in a Supply Chain*. Cuantitative Models for Supply Chain Management. International Series in Operations Research & Management Science, vol. 17, pp: 417-439. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-4949-9_14
 45. Chen, Y. F.; Drezner, Z.; Ryan, J.K. y Simchi-Levi, D. (2000a). *Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times and Information*.

-
- Management Science, vol. 46, pp: 436-443. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) http://www.diku.dk/hjemmesider/ansatte/pisinger/production/SimchiLevi_BullwhipEffectSupplyChain.pdf
46. Chen, Y. F.; Ryan J. K. y Simchi-Levi, D. (2000b). *The Impact of Exponential Smoothing Forecasts on the Bullwhip Effect*. Naval Research Logistics, vol. 47, pp: 269—286. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) https://www.researchgate.net/publication/244975380_The_Impact_of_Exponential_Smoothing_Forecasts_on_the_Bullwhip_Effect.
 47. Chorafas, D. N. (1965). *Systems and simulation*. New York: Academic Press, vol. 14 de Mathematis and Engineering. Series of Monographs and Textbooks (Editado por Richard Bellman. RAND Corporation, Santa Monica, California). 322 páginas. ISBN 9780080957814 Disponible en [fecha de ultimo acceso 20.10.2016] https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=u43Ogf3vs24C&oi=fnd&pg=PP2&ots=zdgbhKlN2e&sig=SCj1VeTnl1Vvd9Df1a9z8LXYV8Q&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
 48. Ciancimino, E.; Cannella, S.; Bruccoleria, M. y Framinanc, J.M. (2012). *On the Bullwhip Avoidance Phase: The Synchronised Supply Chain*. European Journal of Operational Research, vol. 221, n° 1, pp: 49–63. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712001890>
 49. Cox, S.W. *GPSS World: A brief preview (1991)*. Simulation Conference, 1991. Proceedings of the Winter Simulation Conference 1991, pp: 59-61 (1991). Disponible bajo petición en [fecha de ultimo acceso el 15.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/3528117_GPSS_World_A_brief_preview
 50. Crain, R.C. (1997). *Simulation using GPSS/H*. Proceedings of the 29th conference on Winter Simulation Conference (Diciembre 1997). pp: 567-573). Editado por S. Andradóttir, K.J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Disponible en [fecha de última consulta 15-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0567.PDF>.
 51. Crain, R.C. y Henriksen, J.O. (1999). *Simulation using GPSS/H*. Proceedings of the Simulation Conference Proceedings, 1999 Winter Simulation Conference 02/1999. (1999). Disponible en [fecha de última consulta 15-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/023.PDF>
 52. CSIM (2015). *CSIM - Parallel Process and Diagrams Simulator*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponibe en [fecha de ultimo acceso el 18-10-2016] http://www.csim.com/simulator/csim_doc.html

-
53. CSIM (2016a). *Introduction to CSIM Modeling Environment*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <http://www.csim.com/overview.html>
 54. CSIM (2016b). *CSIM Modeling Domains*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <http://www.csim.com/domains/index.html>
 55. CSIM (2016c). *CSIM Tool News*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <http://www.csim.com/status.html#v4.10>
 56. Dahl, O.-J. y Nygaard, K. (1965). *SIMULA – A lenguaje for programming and description of discrete event systems. Introduction and user's manual*. Norwegian Computer Center Doc. 162 páginas
 57. Dahl, O.-J. y Nygaard, K. (1966). *SIMULA: an ALGOL-based simulation language*. Communications of the ACM. Volumen 9(9) pp: 671-678. Septiembre 1966.
 58. Dahle, H.P.; Løfgren, M.; Madsen, O.L. y Magnusson, B. (1986). *The Mjølner Project – A Highly Efficient Programming Environment for Industrial Use*. Mjølner report no. 1, Oslo, Malmø, Aarhus, Lund 1986.
 59. Demetrescu, C.; Finocchi, I. y Ribichini, A. (2011). *Reactive Imperative Programming with Dataflow Constraints*. Proceedings of the 2011 ACM international conference on Object oriented programming systems languages and applications. pp. 407–426. ISBN: 978-1-4503-0940-0 / doi>10.1145/2048066.2048100. Disponible en [fecha de último acceso el 21-11-2016]. https://www.researchgate.net/publication/51887489_Reactive_Imperative_Programming_with_Dataflow_Constraints.
 60. Diamond, B.; Krah, D.; Nastasi, A. y Tag, P. (2010). *ExtendSIM advanced technology: integrated simulation database*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, y E. Yücesan. Páginas 32-39. Disponible en [fecha de último acceso 17-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/004.pdf>
 61. Dias, L.M.S.; Pereira, G.A.B., Vik, P. y Oliveira, J.A. (2011). *Discrete simulation tools ranking – A commercial software packages comparison based on popularity*. ISC 2011, Industrial Simulation Conference, (6-8 de Junio de 2011). Venecia (Italia). Disponible en [fecha de último acceso 17-12-2016] http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/15634/1/ISC_2011_Veneza_5_10.pdf

-
62. Disney, S.M. y Towill, D.R. (2003). *On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy*. Omega, Volumen 31 número 3. Páginas 157-167. Disponible en (fecha de último acceso el 12.10.2016) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048303000288>.
 63. Dutton, J., y Starbuck, W. (1971a): “*Computer simulation of human behavior*”. New York: Wiley. Posteriormente revisado en Starbuck, W. (1983) “*Computer simulation of human behavior*” Systems Simulation and Behavioral Science. Volume 28, Issue 2 (Abril1983). Páginas 154–165. DOI: 10.1002/bs.3830280207 Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/227631355_Computer_simulation_of_human_behavior
 64. Dutton, J., y Starbuck, W. (1971b). *Computer simulation models of human behavior: a history of an intellectual technology*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Volumen 1, Numero 2 (1971) SMC-1. Páginas 128-171. 3830280207 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/3114757_Computer_Simulation_Models_of_Human_Behavior_A_History_of_an_Intellectual_Technology
 65. Elliott C. y Hudak P. (1997). *Functional reactive animation*. International Conference on Functional Programming – Junio 1997. Páginas 163–173. Disponible en [fecha de ultimo acceso 21-11-2016] <http://conal.net/papers/icfp97/icfp97.pdf>
 66. Emshoff, J. R., y Sisson, R.L. (1970). *Design and use of computer simulation models*. 319 páginas. London: ed. MacMillan. ISBN-10: 1114248495/ ISBN-13: 978-1114248496.
 67. EXTENDSIM (2016). *EXTENDSIM: History*. Image That Inc. @ Extendsim. San José, California, Estados Unidos. Disponible en [fecha de último acceso 13-08-2016] http://www.extendsim.com/prods_history.html.
 68. EXTENDSIM (2017). *Updaters for earlier versions of ExtendSim*. Image That Inc. @ Extendsim. San José, California, Estados Unidos. Disponible en [fecha de último acceso 10-10-2017]. <https://www.extendsim.com/support/downloads/updates>
 69. Fisher L.M. (2005). *The Prophet of Unintended Consequences*. Digital strategy-business. Disponible en (fecha de último acceso el 26-10-2016) <http://www.strategy-business.com/article/05308?pg=all>
 70. Fishman, G. S. (1973). *Concepts and methods in discrete event digital simulation*. New York: John Wiley & Sons Inc (5 de septiembre de 1973). 400 páginas. ISBN-10: 0471261556 / ISBN-13: 978-0471261551.

-
71. Fishman, G. S. (1978). *Principles of discrete event simulation*. Editado por John Wiley & Sons Inc el 4 de abril de 1979. 534 páginas. ISBN-10: 0471043958 / ISBN-13: 978-0471043959.
 72. FLEXIM (2016a). *Flexim Simulation* ©: *Homepage*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de último acceso 25-11-2016] <https://www.flexsim.com/>.
 73. FLEXIM (2016b). *Flexim Simulation* ©: *History*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de último acceso 25-11-2016] <https://www.flexsim.com/company/>.
 74. FLEXIM (2017). *Flexim 2015; New Features*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de último acceso 16-01-2017] <https://www.flexsim.com/es/flexsim-2017-scripting-process-flow-improvements-more/>
 75. FLEXTERM (2016), *FLEXTERM: FLEXIM Container terminal*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de último acceso 25-11-2016]. <http://www.flexsim.com.mx/flexsim-ct-flexterm> y <http://www.flexterm.com/>
 76. FLEXTERM (2017). *FLEXTERM: Press Releases*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017]: <http://www.flexterm.com/support/release-notes>
 77. Fonseca i Casas, P. y Casanovas, J. (2009). *JPSS, an open source GPSS framework to teach simulation*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (Editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin y R. G. Ingalls). Páginas: 256-267. Disponible en [fecha de última consulta 12-01-2017]. <http://www.informs-sim.org/wsc09papers/022.pdf>.
 78. Forrester, J.W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press. 479 Páginas. ISBN-10:0262060035, ISBN-13:978-0262060035.
 79. Forrester, J.W. (1969). *Urban Dynamics*. MIT Press. 300 Páginas. ISBN-10:0262060264, ISBN-13:978-0262060264.
 80. Forrester, J.W. (1970). *A World Dynamics Model: Introductory Exercise*. MIT D-memos 1348, 1353-5, 1357&8 y 1360.

81. Forrester, J.W. (1971). *World Dynamics*. Cambridge, Mass. Wright-Allen Press (consultado en edición 1973) (2ª edición revisada de 1979). ISBN 0262560186, ISBN13: 9780262560184). 144 páginas.
82. Forrester, J.W.: (1975). *Collected Papers of Jay Forrester*. Pegasus Communications (ISBN 1883823374, ISBN13: 978-1883823375) 284 páginas.
83. Forrester, J.W.: (1996). *The begining of System Dynamics*. Conferencia en la reunión internacional de la System Dynamic Society de 1989. Editado por Forrester en 1996 y Disponible en [fecha de último acceso el 15-01-2017] en <http://web.mit.edu/syodyn/sd-intro/D-4165-1.pdf>
84. Franta, W. R. (1977). *The process view of simulation*. New York: Elsevier Science Ltd (1 de septiembre de 1977). 256 páginas ISBN-10: 0444002235 / ISBN-13: 978-0444002235.
85. Frazer, J. R. (1975). *Business decision simulation: a time sharing approach*. Reston VA: Reston Publishing. (1 de diciembre de 1975). 154 páginas. ISBN-10: 0879091134 / ISBN-13: 978-0879091132
86. Garrison, W.J. (1991a). *NETWORK II.5 – Users Manual*. CACI Products Co. La Jolla CA.
87. Garrison, W.J. (1991b). *NETWORK II.5, LANNET II.5 and COMNET II.5*. Proceedings of the 23th Winter Simulation Conference, Phoenix, Arizona, USA, (8-11 de diciembre de 1991). Editado por L. Nelson, W.D. Kelton y G.M. Clark. Páginas: 72-76. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 24-02-2017] http://www.informs-sim.org/wsc91papers/1991_0011.pdf
88. Gelenbe, E. y Guennouni, H. (1991). *FlexSim: A flexible manufacturing system simulator*. *European Journal of Operational Research*, Volumen 53(2). (25 de Julio de1991), páginas 149–165. Disponible en [fecha de último acceso el 26-01-2017] https://www.researchgate.net/publication/4941392_FLEXSIM_A_flexible_manufacturin_g_system_simulator
89. Globe, J. (1990). *SIMFACTORY Course Note*. CACI Products Co. La Jolla (California, USA).
90. Globe, J. (1991). *Introduction to SIMFACTORY II-5*. CACI Products Co. La Jolla (California, USA). Proceedings of the 23th Winter Simulation Conference, Phoenix, Arizona, USA, (8-11 de diciembre de 1991). Editado por L. Nelson, W.D. Kelton y G.M. Clark. Páginas: 77-80. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 24-01-2017] http://informs-sim.org/wsc91papers/1991_0012.pdf

-
91. Globe, J. (1997). *MODSIM III- A tutorial*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference – Año 1999. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Páginas 601 – 605. Disponible en [fecha de último acceso el 03-08-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0601.PDF>.
 92. Goldberg, A. (1983). *Smalltalk-80: The Interactive Programming Environment*. Editado por Addison-Wesley (December 1983). 516 páginas. ISBN-13: 978-0201113723.
 93. Goldsman, D.; Nance, R. E. y Wilson, J.R. (2009). *A brief history of simulation*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (Editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin, and R. G. Ingalls) pp: 310-313. Disponible en [fecha de último acceso 29-12-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc09papers/028.pdf>.
 94. Goldsman, D.; Nance, R. E. y Wilson, J.R. (2010). *A brief history of simulation revisited*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, and E. Yücesan). pp: 567- 574. . Disponible en [fecha de último acceso 29-12-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/051.pdf>
 95. González, E.; Pinte, K. y Van der Water, S. (2013). *Object-oriented Reactive Programming is Not Reactive Object-oriented Programming*. Universidad de Bruselas. Disponible en [fecha de ultimo acceso 21-11-2016] <http://soft.vub.ac.be/Publications/2013/vub-soft-tr-13-16.pdf>
 96. Gordon, G. (1960). *A general purpose systems simulator*. (Manual no publicado.) White Plains, N.Y.: IBM. Corp. ASDD Commercial Dept.
 97. Gordon, G. (1961): *A general purpose systems simulation program*. Proceeding AFIPS'61 (Eastern), Eastern Joint Computer Conference: Computers - key to total systems control (pg 87-104) (12-14 diciembre, 1961). doi>10.1145/1460764.1460768
 98. Gordon, G. (1969). *System simulation*. (2ª edición de junio 1978). Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 324 páginas. ISBN-10: 0138817979 / ISBN-13: 978-0138817978
 99. Gordon, G. (1975). *The application of GPSS V to discrete system simulation*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. (Julio 1975) 336 páginas. ISBN-10: 0130390577 / ISBN-13: 978013039057
 100. Gordon, G. (1978). *System simulation - 2nd edition*. New Yersey : Prentice-Hall. Inc. 324 Páginas. ISBN-10: 0138817979 y ISBN-13: 978-0138817978.
 101. Greenberg, S. (1972). *GPSS Primer*. New York: John Wiley & Sons Inc. (1ª Edición 14 de junio de 1972). 344 páginas. ISBN-10: 0471324906 ISBN-13: 978-0471324904.

-
102. Gregor, D. (2013a). *Generic Programming*. The Trustees of Indiana University. Disponible en [fecha de último acceso 22-01-2017] <http://www.generic-programming.org/>
 103. Gregor, D. (2013b). *Generic Programming: Libraries*. The Trustees of Indiana University. Disponible en [fecha de último acceso 22-01-2017] <http://www.generic-programming.org/software/libraries.php>
 104. Guennouni, H. (1989). *Manuel d'utilisation de FLEXSIM*. Ecole des Hautes en Informatique, Paris France, 1989.
 105. Guetzkow, H.S.; Kotler, P. y Schultz, R. (1972). *Simulation in social and administrative science*. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall. 768 Páginas. ISBN 0138103828, ISBN-13: 9780138103828.
 106. Hasan, M.H. (2012). *Framework for Intelligent Decision Support System for Traffic Congestion Management System*. Engineering, Volumen 2 (2010). Páginas 270-289. doi:10.4236/eng.2010.24037. Disponible en [fecha de último acceso el 02-11-2016] http://file.scirp.org/pdf/Engineering20100400008_74556187.pdf
 107. Heath, S.K.; Brailsford, S.C.; Buss, A. y Macal C.M. (2011). *Cross-paradigm simulation modeling: challenges and successes*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspace, K.P. White, and M. Fu, eds. Disponible en [fecha de última consulta 07/07/2016] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a558539.pdf>
 108. Henriksen, J. O. (1976). *Building a better GPSS: a 3:1 enhancement*. Proceedings of the 1975 Winter Simulation Conference, pp: 465-469. New Jersey: AFIPS Press
 109. Henriksen, J. O. (1985). *The development of GPSS/85*. Proceedings of the 18th Annual Symposium on Simulation, editado por A. Miller (pp: 61-67). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press. Disponible bajo petición en [fecha de ultimo acceso el 10.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/234796544_The_development_of_GPSS85
 110. Henriksen, J. O. (1993). *SLX. The successor of GPSS/H*. Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, editado por G. Evans, M. Mollaghasemi, E. Russell y W. Biles, pp: (502-509). Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
 111. Henriksen, J.O. (2000). *SLX – The X is for Extensibility*. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Editado por J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, y P. A. Fishwick.. Disponible en [fecha de último

-
- acceso el 23-07-2016] <http://www.wolverinesoftware.com/SLX00.pdf>
<http://www.informs-sim.org/wsc00papers/027.PDF>
112. Herlyn, W. (2014). *The Bullwhip Effect in expanded Supply Chains and the Concept of Cumulative Quantities*, incluido en Blecker et al. (Eds.): "Innovative Methods in Logistics and Supply Chain Management". Páginas 513-528, epubli GmbH, Berlin, 2014, ISBN 978-3-8442-9878-9. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) <https://hiel.org/publications/2014/19/515.pdf>.
 113. Herper, H. y Ståhl, I. (1999). *Micro-GPSS on the Web and for Windows: a tool for introduction to simulation in high schools*. Proceedings del 31 Winter Simulation Conference. pp: 298- 306). Editado por P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, y G. W. Evans. Disponible en [fecha de consulta el 03-11-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/042.PDF>
 114. Hielscher (2011). *Simulation and Modeling I: Simulation software*. Lectures notes del Departamento de Ciencias Computacionales de la Friedrich – Alexander Universitat (Erlangen – Nürnberg, Alemania). Accesibe en [fcha de ñultimo acceso el 25/10/2014] http://www7old.informatik.uni-erlangen.de/~ksjh/Teaching/1112W/sml/r/lenotes/SM_10_SimSW.pdf
 115. Hillen, D.W. y Warner D. (1993). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceedings of the 27th Winter Simulation Conference. (1993). Editado por G.W.Evans, M. Mollaghasemi , E.C. Rusell y W.E. Biles. Páginas: 277-282. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] http://www.informs-sim.org/wsc93papers/1993_0040.pdf.
 116. Hodge, B.-M- S.; Huang, S.; Siirola, J.D.; Pekny, J. F. y Reklaitis G.V. (2011). *A multi-paradigm modeling framework for energy systems simulation and analysis*. Computers & Chemical Engineering. Volume 35, Issue 9, 14 September 2011, Páginas 1725-1737. Disponible en [fecha de ultimo acceso 04-11-2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135411001669>
 117. Hollocks, B.W. (2008). *Intelligence, innovation and integrity—KD Tocher and the dawn of simulation*. Journal of Simulation 2008(2), pp: 128–137. Disponible en (fecha de última consulta el 29/12/2016). doi:10.1057/jos.2008.15 <http://www.themedfomscu.org/media/elip/jos200815a.pdf>.
 118. Holmevik, J.R. (1994). *Compiling SIMULA: a historical study of technological genesis*. IEEE Annals of the History of Computing, 16 (4), p. 25-37, 1994. Artículo también presentado en 18th ASU Conference en 1992, y publicado en SIMULA Newsletter Vol.20 (1), October 1992.

-
119. Hullinger, D.R. (1999). *Taylor Enterprise Dynamics*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Editado por P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans. Páginas 227-229. Disponible en [fecha de última consulta el 24-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/030.PDF>
 120. Hurst, N.R. y Pritsker, A.A.B. (1973). *Simulation of a chemical reaction process using GASP IV*. SIMULATION, Volumen 21, número 3, Páginas 71-75.
 121. ITInc (1989). *Extend 1.1 Software Manual*. Imagine That Inc. San Jose (California, USA)..
 122. ITInc (1992). *Extend 2.0*. Imagine That Inc. Software Manual, San Jose (California, USA)..
 123. ITInc (1995). *User's Manual for Extend 3.x*. Imagine That Inc. San Jose (California, USA).
 124. ITInc (2001). *Extend 5.0 User's Guide*. Imagine That Inc. San Jose (California, USA).
 125. ITInc (2007). *ExtendSim 7 User Guide*. Imagine That Inc. San Jose (California, USA).
 126. Karakaneva, J. (1999). *The modular simulation language (MODSIM) – A Powerful Tool for Computer Simulation*. Information & Security. An International Journal, Volumen 3. Páginas 132-139. Disponible en [fecha de última consulta 12-07-2016] http://connections-qj.org/system/files/03.09_Karakaneva.pdf.
 127. Katalin, N. (1990). *Analytica: A Software Tool for Uncertainty, Analysis and Model Communication*. Capítulo 10 de “Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis” (M. Granger Morgan y Max Henrion). Cambridge University Press, New York, 1990, REvisada en 1992 y Reeditado en 1998. Páginas 257-290. ISBN-10: 0521427444 / ISBN-13: 978-0521427449 (346 páginas).
 128. Kay, A.C. (1993). *The Early History of Smalltalk*. Apple Computer. Disponible en [fecha de última consulta 22-01-2017] <http://worrydream.com/EarlyHistoryOfSmalltalk/>.
 129. Kayame, M.; Kunimune, H.; Hasimoto, M. y Otami, M. (2014). *Algorithmic Thinking Learning Support System in Block Programming Paradigm*. The 22nd International Conference on Computers in Education, At Nara, Japan. Asia – Pacific Society for Computers in Education. Página 276-284. También presentado en International Journal of Computer and Communication Engineering, Vol. 3, No. 2, March 2014 (DOI: 10.7763/IJCCE.2014.V3.307). Páginas 134-140. Disponible en [fecha de último acceso el 01.05.2017] en <http://www.ijcce.org/papers/307-E049.pdf>.

-
130. Kelton W.D.; Sadowski R.P. y Sadowski D.A (2009). *Simulation with ARENA, 5th Edition* Ed. McGraw-Hill Professional 5th Edicion (2009). 656 páginas. ISBN-10: 0073376280 ISBN-13: 978-0073376288 (2009).
 131. Kelton, W.D., Sadowski, R. y Zupick, N. (2014). *Simulation with Arena, 6th edition*. Ed. McGraw-Hill Professional (2014) (656 páginas).ISBN-10: 0073401315; ISBN-13: 978-0073401317
 132. King, C.B. (1996). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceedings of the 28th Winter Simulation Conference. ed. J. M. CIIarnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner, y J. J. Sulvain. Páginas: 569-574 Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/082.pdf>.
 133. Kirkerud, B. (1989). *Object-Oriented Programming with SIMULA*. Addison-Wesley, Coleccion International Computer Science. 529 Páginas. ISBN-10: 0201175746 / ISBN-13: 978-0201175745.
 134. Kiviat, P. J. y Colker, A. (1964). *GASP-A General Activity Simulation Program*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1964. Disponible en [fecha de última consulta el 22-01-2017] <http://www.rand.org/pubs/papers/P2864.html>.
 135. Kiviat, P. J. (1966). *Introduction to the SIMSCRIPT II Programming Language*. RAND Corporation (Santa Monica, California, USA). Disponible en [fecha de última consulta el 25-11-2017] <http://www.rand.org/pubs/papers/P3314.html>.
 136. Kiviat, P.J. (1968). *Simulation Programming Using SIMSCRIPT II*. RAND Corporation (Santa Mónica, California, USA). Disponible en [fecha de última consulta el 25-11-2017] <http://www.rand.org/pubs/papers/P3861.html>.
 137. Kiviat, P.J. y Villanueva, R. (1968). *The SIMSCRIPT II Programming Language: Reference Manual*. RAND Corporation (Santa Mónica, California, USA). Disponible en [fecha de última consulta el 25-11-2017] http://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM5776.html.
 138. Kiviat, P. J.; Villanueva, R. y Markowitz, H. M. (1968). *The SIMSCRIPT II programming language*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall. 386 Páginas. ISBN-10: 0138101760 e ISBN-13: 978-0138101763
 139. Kiviat, P.; Villanueva, R., Markowitz, H. y Rusell, E.C. (1973). *SIMSCRIPT II.5 programming language*. La Jolla CA: Editado por Consolodated Analysis Centers Inc. (CACI). 441 páginas. Re-editado en Junio 1983. ISBN 9996806332 / ISBN-13 9789996806339

140. Kleinen, J. (1974) (vol 1) y (1975) (vol 2). *Statistical techniques in simulation*. New York: Marcel Dekker. 775 Páginas. ISBN-10: 0824772202 / ISBN-13: 978-0824772208.
141. Knuth, D.E. (1980): ***Algorithms in modern mathematics and computer science***. Stanford Department of Computer Science Report (1980). Consultado en Knuth, D.E. (2005) “*Algorithms in Modern Mathematics and Computer Science*” - Volume 122 of the series Lecture Notes in Computer Science pp 82-99. ISBN: 978-3-540-11157-3.
142. Koh, P.-H.; Goh, J. L.-K.; Ng , H.-S. y Ng, H.C. (1994a). *Using simulation to preview plans of a container port operations*. Proceeding of the 26th Winter Simulation Center (1994). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A: Sadowski y A.F. Seila. Páginas 1109-1115. Disponible en [fecha de última consulta el 24.10.2016] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0162.pdf
143. Koh, H.; Tan, S.L.; Goh, L.K y Ng, K.L. (1994b). *A decision support system for container port operations*. New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications (1994). Páginas 451–457
144. Korn, G. A., y Wait J. V. (1978). *Digital continuous system simulation*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. (editado en Febrero 1978). 320 páginas. ISBN-10: 013212274X / ISBN-13: 978-0132122740.
145. Kowalski, R. A. (1973). *Predicate Logic as a Programming Language*. Memo 70, Department of Artificial Intelligence, Edinburgh University. 1973. También disponible en Proceedings IFIP Congress, Stockholm, North Holland Publishing Co., 1974, pp. 569–574. Disponible en [fecha de último acceso el 03-11-2016] <http://www.doc.ic.ac.uk/~rak/papers/IFIP%2074.pdf>.
146. Krah, D. (2012). *ExtendSIM: A History of Innovation*. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. Editado por C. Laroque, J. Himmelsbach, R. Pasupathy, O. Rose, and A.M. Uhrmacher. 8 Páginas . Disponible en [fecha de ultimo acceso el 16-10-2016] <http://informs-sim.org/wsc12papers/includes/files/vdrp101.pdf>
147. Krah, D. y Nastasi, A. (2014). *Reliability modelling with ExtendSIM*. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Editado por A. Tolk, S. Y. Diallo, I. O. Ryzhov, L. Yilmaz, S. Buckley, y J. A. Miller. Páginas 4219-4225. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 16-01-2017] <http://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/476.pdf>
148. Kristensen, B.B.; Madsen, O.L.; Møller-Pedersen, B. y Nygaard, K (1976). *BETA ProjectWorking Notes 1-8*. Norwegian Computing Center, Oslo and Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus, 1976–1982.

-
149. INCONTROL (2016). *Enterprise Dynamics ® 10 Release!*. INCONTROL Simulation Solutions. Utrecht (Holanda). Disponible en [fecha de último acceso el 25-01-2017] <http://www.incontrolsim.com/enterprise-dynamics-10-released/>
 150. LaLonde, W. (1994). *Discovering Smalltalk*. Benjamin/Cummings Series in Object-Oriented Software Enginee - 1st Edition publicado por Addison-Wesley Professional; (Enero 1994). 576 páginas. ISBN-13: 978-0805327205.
 151. Lane D.C. (2007). *The Power of the Bond Between Cause and Effect (Full Version): Jay Wright Forrester and the Field of System Dynamics*. System Dunamics Review 23 (2-3) pp: 95-118.
 152. Lara, J.; Levendovszky, T.; Mosterman, P. y Vangheluwe H. (2008). *Second International Workshop on Multi-Paradigm Modeling: Concepts and Tools*, editado por H. Giese, Models in Software Engineering. Vol. 5002, 237-246: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-69069-6. doi>10.1007/978-3-540-69073-3_25.
 153. Lavery, E., Beaverstock, M.; Greenwood, A.; Nordgren, W. y Warr S. (2011). *Applied Simulation Modeling and Analysis using FlexSim*. (3rd Edition 3 de enero de 2011) Publicado por FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem, UT 84097 USA. Canyon Park Technology Center (2011). 539 páginas. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 15-01-2017] <https://www.amazon.es/Applied-Simulation-Modeling-Analysis-FlexSim-ebook/dp/B0096CP1L6>
 154. Law, A.M. y Larmeu C.S. (1984). *SIMSCRIPT II-5*. CACI Productu Co. La Jolla CA.
 155. Law, A.M y McComas, M.G. (1996). *Experfit: Total support for simulation input modeling*. . Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference. Editado por J.M. Charnes,D. J. Morrice, D.T. Brunner y J.J. Swain. Páginas 588-593. Disponible en [fecha de última consulta el 23-01-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/086.pdf>
 156. Law, A.M. (2014): *Simulation Modeling and Analysis*. 5^a Edition McGraw-Hill, January 2014, 804 páginas (ISBN-13: 978-0073401324 ISBN-10: 0073401323)
 157. Law, A.W. (2015). *Discrete Event and Agent Based simulation and where to use each*. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference- Editado por L. Yilmaz, W. K. V. Chan, I. Moon, T. M. K. Roeder, C. Macal, y M. D. Rossetti. Páginas 1866. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 18-10-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc15papers/193.pdf>

-
158. Lee, H.L.; Padmanabhan, V. y Whang, S. (1997). *Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect*. Management Science, Volumen 43, número 4. Páginas 546-558. Disponible en (fecha de último acceso el 12.10.2016) <http://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/mnsc.1040.0266>.
 159. Lee, H.L. (2010). *Taming the bullwhip*. Journal of Supply Chain Management, Volumen 46 , número 1. Página 7. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) <https://www.deepdyve.com/lp/wiley/taming-the-bullwhip-E87Fc1sSnC>.
 160. Lewis, T. G., y Smith, B. J. (1979). *Computer principles of modelling y simulation*. Boston: Houghton y Mifflin. 275 Páginas. ISBN-10: 0395271436 / ISBN-13: 978-0395271438.
 161. Lilegdon, W.R., Martin, D.L. y Pritsker, A.A.B. (1994). *FACTOR/AIM: a manufacturing simulation system*. SIMULATION, 62(6), 367-372.
 162. Liu, C. (2000). *Smalltalk, Objects, and Design*. Publicado por iUniverse (April 27, 2000). 312 páginas ISBN-10: 1583484906 / ISBN-13: 978-1583484906.
 163. Lynch, C.; Padilla, J.; Diallo, S.; Sokolowski, J. y Banks C. (2014). *A multi-paradigm modelling framework for modeling and simulationg problem situations* Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. A. Tolk, S. Y. Diallo, I. O. Ryzhov, L. Yilmaz, S. Buckley, and J. A. Miller, eds. Páginas 1688 – 1698. . Disponible en [último acceso en 15/11/2017] <http://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/149.pdf>
 164. Macal, C. (2010). *To agent-based simulation from system dynamics*. En Simulation Conference (WSC), Proceedings del Winter Simulation Conference 2010; pp: 371 - 382.
 165. Madsen, O.L.; Møller-Pedersen, B., Nygaard, K. (1983). *From SIMULA 67 to BETA*. Proceedings of the 11th SIMULA 67 User's Conference. Paris 1983. Norwegian Computing Center, 1983.
 166. Madsen, O.L.; Møller-Pedersen, B. y Nygaard N. (1993). *Object-Oriented Programming in the BETA Programming Language*. Addison-Wesley, June 1993, ISBN 0-201-62430-3, 337 páginas. Reimpresión por Mjølner Informatics en el año 2000. Disponible en internet en https://www.researchgate.net/publication/220695504_Object-Oriented_Programming_in_the_BETA_Programming_Language
 167. Madsen, O.L. (2016). *BETA lenguaje home page*. Computer Science Department, Aarhus University. Disponible en [fecha de ultimo acceso 15-01-2017]. <http://daimi.au.dk/~beta/>

-
168. Maidstone, R.: (2012) *Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison*. Lancaster University. Disponible en [fecha de último acceso el 25-10-2016] <http://www.lancs.ac.uk/~maidston/Short%20Project1.pdf>
169. Maisel, H. y Gnugoli, G. (1972). *Simulation of discrete stochastic systems*. Palo Alto: Science Research Associates. (1ª edición Junio 1972). 465 páginas. ISBN-10: 0574161333 / ISBN-13: 978-0574161338
170. Majid, M.A.; Aickelin, U. y Siebers, P.-O. (2009). *Comparing Simulation Output Accuracy of Discrete Event and Agent Based Models: A Quantitative Approach*. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, 2009. Páginas 177-184. Disponible en [fecha de último acceso el 18/10/2016] <http://arxiv.org/pdf/1001.2170.pdf>.
171. Maria, A. (1997). *Introduction to modeling and simulation*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers y B. L. Nelson. pp: 7-13 (1997). Disponible en (fecha de último acceso el 29/12/2016): https://www.inf.utfsm.cl/~hallende/download/Simul-2-2002/Introduction_to_Modeling_and_Simulation.pdf
172. Markowitz, H. M.; Hausner, B. y Karr H. W. (1962). *SIMSCRIPT: A simulation programming language*. Memorandum RM-310-PR (Noviembre 1962) preparado para United States Air Force Project RAND. The Rand Corporation. Santa Mónica – California. Editado también en 1963 por Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. Memorandum original disponible en [fecha de último acceso el 13/09/2016] https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2009/RM3310.pdf
173. Markowitz, H. M. (1979). *SIMSCRIPT: Past, present, and some thoughts about the future*. Academic Press. Capítulo en Current issues in computer simulation (Editado por N. R. Adam y A. Dogramaci) New York (USA). Páginas: 27-60.
174. Markowitz, H. M. (1990). *Harry M. Markowitz - Biographical*. Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. disponible en [fecha de último acceso el 25/01/2017]. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1990/markowitz-bio.html
175. Marti, J. (1999). *Object-oriented Modeling And Simulation With Modsim III*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (USA).
176. Martin, F. (1968). *Computer modeling and simulation*. New York: John Wiley & Sons; (Enero 1968). 344 páginas. ISBN-10: 0471573523 / ISBN-13: 978-0471573524

-
177. Martín-Adino, R. (2006). *El efecto látigo (Bullwhip) en las cadenas de suministro y la dependencia de los agentes que las integran*. Tesis Doctoral realizada en el Departamento de Organización Industrial de la Universidad Pontificia de Comillas de Madrid – ETS de Ingeniería ICAI. Disponible en (fecha de último consulta el 12.10.2016) http://www.sp.upcomillas.es/sites/DOI/Documentos%20Pblicos/www_DOI/tesis/tesis_R_amonMartinAndino.pdf.
 178. McMillan, C.; Gonzales, R. y Schriber, T.J. (1973). *Systems analysis: A computer approach to decision models*. Homewood IL: Pubicado por R.D. Irwin (Irwin series in quantitative analysis for business). 610 páginas. ISBN-10:, 0256014396 / ISBN 13: 9780256014396
 179. Meadows, D.H.; Meadows, G.; Randers, J. y Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth*. New York Universe Books. 207 páginas. ISBN-10: 0451057678. ISBN-13: 978-0451057679
 180. Meadows, D.H. y Randers, J. (1992). *Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future*. Hardcover – May, 1992 ISBN-13: 978-0930031558 ISBN-10: 0930031555
 181. Meier, R.; Newell, W. T. y Pazer, H. L.(1969). *Simulation in business and economics*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 369 páginas. ISBN-10: 0138103747 / ISBN-13: 978-0138103743.
 182. Meyer, B. (1991). *Eiffel: The Language*. Prentice Hall, segunda edición, 1992 (Primera edición: 1991). 650 páginas. ISBN-10: 0132479257 y ISBN-13: 978-0132479257.
 183. Meyer, B. (1998). *Construcción de Software Orientado a Objetos*. (Traducido por Luis Joyanes Aguilar) Prentice Hall. 1198 páginas. ISBN-10: 9788483220405
 184. Minuteman Software (2010) [recurso en línea]. *GPSS World* ©. Holly Springs, North Carolina. Disponible en [fecha de última consulta 15-01-2017] <http://www.minutemansoftware.com/>.
 185. Mize, J. H., y Cox J. (1968). *Essentials of simulation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs. (Prentice-Hall international series in industrial engineering and management science). New York. 234 páginas ISBN-10: 0132889021 / ISBN-13: 978-0132889025.
 186. Mullarney, A. (1996). *MODSIM III Tutorial*. Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference – Año 1996. Editado por J.M. Charnes,D. J. Morrice, D.T. Brunner y J.J. Swain. Páginas 542-546. Disponible en [fecha de última consulta el 23-11-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/077.pdf>.

-
187. Murty, K.G.; Liu, J.; Wan, Y.-w.; Zhang, C.; Tsang, M. y Linn, R. (2000). *DSS (decision support systems) for operations in a container shipping terminal*. Proceedings of the First Gulf Conference on Decision Support Systems, Kuwait, 6–8 Noviembre, 2000. Páginas 189–208. Disponible en [fecha de último acceso el 25.10.2016] <http://www-personal.umich.edu/~murty/kuwait4.pdf>
188. Narsingh, D. (1979). *System simulation with digital computers*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 216 páginas. (re-editado en 1978 por PHI Learning y el 30 de Agosto de 2004 por Prentice-Hall of India Pvt.Ltd con ISBN-10: 8120300289 y ISBN-13: 978-81203002).
189. Nastasi, A. (2016a). *The impact of ExtendSIM on the industry*. Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference. Editado por T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and y S. E. Chick. Página 3592. Disponible en [fecha de última consulta el 24-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc16papers/337.pdf>
190. Nastasi, A. (2016b). *Innovative ExtendSIM solutions*. Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference. Editado por T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and y S. E. Chick. Página 3618. Disponible en [fecha de última consulta el 24-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc16papers/337.pdf>
191. Naylor, T.; Balintfy, J. L.; Burdick, D. S. y Chu, K. (1966). *Computer simulation techniques*. New York: Wiley. 370 Páginas. ISBN-10: 0471630608 / ISBN-13: 978-0471630609
192. Naylor, T. (1969). *The design of computer simulation experiments*. Durham NC: Duke University Press. 417 Páginas. ISBN-10: 0822302322 / ISBN-13: 978-0822302322
193. Neumann J.V. y Goldstine, H.H. (1947) *Numerical Inverting of Matrices of High Order*. American Mathematical Society Bulletin, Vol. 53(11). pp: 1021-1099.
194. Nilsson, H.; Courtney, A. y Peterson J. (2011). *Functional Reactive Programming. Continued**. Department of Computer Science – Yale University. Disponible en [fecha de último acceso 21-07-2016] <http://haskell.cs.yale.edu/wp-content/uploads/2011/02/workshop-02.pdf>.
195. Nordgren, W. (1994). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceeding of the 27th Winter Simulation Conference (1994). *IEEE Computer Society*, (Washington, USA). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski y A.F. Seila. Páginas: 446-449. Disponible en [fecha de último acceso el 17-01-2017] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0064.pdf

-
196. Nordgren, W. (1998). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceeding of the 30th Winter Simulation Conference (1998). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sawosdki y A.F. Salla. Páginas: 263-270. Disponible en [fecha de último acceso 15-11-2017] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0064.pdf
 197. Nordgren, W. B.: (2002). *FLEXIM Simulation Enviroment*. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (editado por E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, y J. M. Charnes) Disponible en [fecha de último acceso 15-11-2017] Páginas 250-252. <http://informs-sim.org/wsc02papers/032.pdf>
 198. Nordgren, W. B.: (2003). *Flexible simulation (Flexsim) software: Flexsim simulation environment*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (Editado por S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, y D. J. Morrice). Páginas 197-201 <http://informs-sim.org/wsc03papers/024.pdf>
 199. Nordhaus, W.D. (1973). *World Dynamics: Measurement without Data*. The Economic Journal, Vol. 83, No. 332. (Dec., 1973), pp: 1156-1183. Disponible en (fecha de último acceso el 29-12-2016) <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/worldodynamics.pdf>.
 200. Nørmark, K. (2013). *Programming Paradigms*. Department of Computer Science, Aalborg University, Denmark. Disponible en [fecha de último acceso el 01.05.2017]: http://people.cs.aau.dk/~normark/prog3-03/html/notes/paradigms_themes-paradigms.html
 201. Nygaard, K y Dahl, O.-J. (1962). *SIMULA - An Extension of ALGOL to the Description of Discrete-Event Networks*. 2nd International Conference on Information Processing (IFIP 62 World Congress) (Munich) (1962).
 202. Nygaard, K., y O.-J. Dahl. (1978). *The development of the SIMULA languages*. ACM SIGPLAN Notices 13 (8): 245–272.
 203. Nygaard, K., y Dahl. O.-J. (1981). *The development of the SIMULA languages*. Academic Press. History of programming languages (editado por R. L. Wexelblatt) New York (USA).
 204. O'Donovan, T. M. (1976-1ª edición y 1979-2ª edición). *GPSS simulation made simple*. New York y Chichester, Reino Unido: Wiley. 140 Páginas. ISBN-10: 0471276146 / ISBN-13: 978-0471276142
 205. O'Reilly, J. J. y Lilegdon, W. R. (1999). *Introduction to AWESIM*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Editado por P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans. Páginas 196-221. Disponible en [fecha de última consulta el 24-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/025.PDF>

-
206. Oracle (2016). *Java 1995-2015: 20 Years*. Oracle Corporation, Redwood (San Francisco, USA). Disponible en [fecha de acceso 22-01-2017] <http://oracle.com.edgesuite.net/timeline/java/>
207. Page E.H. y Tufarolo, J. (1997). *An Interview with Philip J. Kiviat*. Association for Computing Machinery, Inc. Recuso en línea disponible en [fecha de última consulta el 22-01-2017] <http://www.acm-sigsim-mskr.org/Articles/KiviatInterview/kiviatInterview.htm>
208. Panda, D.K.; Basak, D.; Dai, D. Kesavan, R.; Sivaram, R.; Banikazemi, M. y Moorthy V. (2007). *Simulation of modern parallel systemas: A CSIM-Based Approach*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Páginas 1013 – 1020. Disponibe en [fecha de ultimo acceso el 18-10-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/1013.PDF>
209. Pegden, C.D. y Pritsker A. (1979). *SLAM: Simulation Language for Alternatives Modeling*. Simulation. Transactions of the Society for Modeling and Simulation International 33(5):145-157. DOI: 10.1177/003754977903300502. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 22-01-2017] https://www.researchgate.net/publication/242924677_SLAM_Simulation_language_for_alternative_modeling
210. Pegden, C. D. (1982). *Introduction to SIMAN*. Systems Modeling Corporation. Publicado con posteriridad en Proceedings del 16th Winter Simulation Conference 1984. Páginas 34-41. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 22-01-2017] <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=800013.809430>
211. Pegden, C.D. (1990). *Introduction to simulation with SIMAN*. Universidad de Michigan. Ed. McGraw-Hill. 615 páginas. ISBN 0070492174 y 9780070492172.
212. Pegden, C.D. y Davis, D.A. (1992). *Arena: a SIMAN/Cinema-based hierarchical modeling system*. Proceedings of the 1992 – 24th Winter Simulation Conference. (ISBN:0-7803-0798-4), pp: Pages 390-399. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 22-01-2017]
213. Pegden, C.D.; Shannon, R.E. y Sadowski, R.P. (1995). *Introduction to Simulation Using SIMAN*. McGraw-Hill, 1995 - 600 páginas, ISBN 0071138102, 9780071138109.
214. Pegden, C.D. (2007). *SIMIO: A new simulation system based on intelligent objects*. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference (editado por: SG Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, JD Tew, and RR Barton. Páginas: 2293-2300.

-
215. Pegden, C.D. y Sturrock D. (2013). *Rapid Modeling Solutions: Introduction to Simulation and Simio*. CreateSpace Independent Publishing Platform (ISBN-13: 978-1492967132 ISBN-10: 1492967130). 130 Páginas
216. Poole, T., y Szymankewicz, J. (1977). *Using simulation to solve problems*. McGraw-Hill (London). 276 Páginas. ISBN-10: 0070844720 / ISBN-13: 978-0070844728.
217. Pooley, R.J. (1987). *An Introduction to Programming in SIMULA*. Alfred Waller Ltd (Oxford, febrero 1987). 344 Páginas. ISBN-13: 978-0632014224 / ISBN-10: 0632014229.
218. Pritsker, A.A.B. y Kiviat, P.J. (1969). *Simulation with GASP-II: a FORTRAN based simulation language*. Prentice-Hall- 332 páginas. ISBN-10: 0138104247 / ISBN-13: 978-0138104245.
219. Pritsker, A.A.B. y Hurst, N.R. (1973) *GASP IV: A combined continuous - discrete FORTRAN-based simulation language*. *SAGE Journals Volumen 21(3) Paginas 65-70*. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 22-01-2017] <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/003754977302100302>
220. Pritsker, A.A.B. (1974a). *The GASP IV Simulation Language*. John Wiley & Sons, New York. (1ª Edición 3 de julio de 1974). 470 páginas ISBN-10: 0471700452 / ISBN-13: 978-0471700456
221. Pritsker, A.A.B. (1974b):. *The GERTE user's manual*. Pritsker & Associate, Inc., West Lafayette, IN. No localizado pero refenciado en Wilson y Goldsman (2001).
222. Pritsker, A.A.B.; Wortman, D.B.; Chubb, G.P. y Seifert, D.J. (1974). *SAINT: systems analysis of integrated networks of tasks*. Proceedings of the Pittsburgh Modeling and Simulation Conference, pp. 1201-1205.
223. Pritsker, A.A.B. y Young, R.E. (1975). *Simulation with GASP PL/1: A PL/1 Based Continuous/Discrete Simulation Language*. John Wiley & Sons, New York. 352 páginas. (1ª Edición 1 de enero de 1976) ISBN-10: 0471700460 / ISBN-13: 978-0471700463.
224. Pritsker, A.A.B. (1977). *Modeling and Analysis Using Q-GERT Networks*. Halsted Press, John Wiley & Sons, New York. (1ª Edición 1977, 2ª Edición 1979). 480 páginas. ISBN-10: 0470266481 / ISBN-13: 978-0470266489
225. Pritsker, A.A.B. (1979). *Gasp: Present Status and Future Prospects*. Capítulo 4, pp: 61-70 del libro “*Current Issues in Computer Simulation*” editado por Adam, N.R. y Drogramaci, A. Academic Press Inc. London Ltd – London ISBN: 0-12-044120-9.

-
226. Pritsker, A.A.B. y Pegden, C.D. (1979). *Introduction to Simulation and SLAM*. Halsted Press, John Wiley & Sons, New York (1ª Edición 11 de abril de 1979). 588 páginas. ISBN-10: 0470265884 / ISBN-13: 978-0470265888.
227. Pritsker, A.A.B. (1984). *Introduction to Simulation and SLAM II*. 2ª edición, Halsted Press, John Wiley & Sons, New York. (3ª edición en 1986 y 4ª edición en 1995). Consultado en su 4ª Edición. Publicado por Wiley (31 enero 1995). 839 Páginas. ISBN-10: 0470234571 / ISBN-13: 978-0470234570
228. Pritsker, A. A. B. (1986). *Introduction to Simulation and Slam II*. Westlafayette, Systems Publishing Corporation. Consultada la 4ª edición. New York, John Wiley & Sons (4ª edición, 31 de enero de 1995). 839 páginas. ISBN-10: 0470234571 / ISBN-13: 978-0470234570.
229. Pritsker, A.A.B.; Grant, F.H. y Duket, S.D. (1986a). *Simulation and real time factory control*. Paper presentado en CASA/SME Real Time Factory Control Seminar, 13- 15 May 1986 (Chicago) y reimpreso en páginas 472-483 de Pritsker, A.A.B. (1990)
230. Pritsker, A. A. B.; Rolston, L.J. y Floss, P. (1986b). *Introduction to Simulation and Slam II, Solutions Manual*. Systems Publishing Corporation ©1986 (editado junio 1986). 305 páginas ISBN:0938974017. ISBN-13: 978 - -0938974017.
231. Pritsker, A. A. B.; Sigal, C. E. y Hammesfahr, R. D. J. (1989). *SLAM II. Network Models for Decision Support*, New Jersey, Prentice-Hall.
232. Pritsker, A.A.B. (1990). *Papers, Experiences, Perspectives, Systems*. Publishing Corporation, West Lafayette, IN. Consultado en edición de Scientific Press Inc. (1 de diciembre de 1993) 547 Páginas. ISBN-10: 0894262459 / ISBN-13: 978-0894262456.
233. Pritsker, A.A.B. y O'Reilly, J.J. (1996). *AweSim: the integrated simulation system*. Proceedings of the 28th Winter Simulation Conference (Coronado, California, USA —08-11 diciembre de 1996). IEEE Computer Society Washington, DC, USA ©1996. Páginas 481-484. ISBN:0-7803-3383-7. Disponible en [fecha de última consulta el 25-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/067.pdf>
234. Pritsker, A.A.B.; O'Reilly, J.J. y LaVal, D.K. (1997). *Simulation with Visual SLAM and AweSim*. John Wiley & Sons, New York. Consultado en 2ª Edición (19 de Marzo de 1989). 852 Páginas. Language: English. ISBN-10: 0471352934 / ISBN-13: 978-0471352938
235. Pritsker, A.A.B. y O'Reilly, J. (1999). *Simulation with Visual SLAM and AweSIM*. 2nd Edition Systems Publishing Corporation. Indiana (EEUU)- Editado por Alan B. Pritsker y Jean J. O'Reilly. 890 Páginas. ISBN 0471352934. También referenciado como John Wiley

-
- & Sons (2ª edición, 19 de marzo de 1999, New York). 852 páginas ISBN-10: 0471352934 / ISBN-13: 978-0471352938.
236. Pritsker Corporation. (1989). *SLAM SYSTEM: total simulation Project support*. Pritsker Corporation, Indianapolis, IN. No localizado pero refenciado en Wilson y Goldsman (2001).
 237. Promodel (2012). *Welcome to NewPromodel Blog*. Promodel Corporation. Allentown (Pensilvania, USA) Disponible en [fecha de último acceso el 25-01-2017] <http://blog.promodel.com/2012/07/26>
 238. Pugh, A.L., III, (1963). *DYNAMO user's manual*. MIT Press. 57 páginas.
 239. Pugh, A.L., III, (1986). *Professional DYNAMO Plus Reference Manual*. 5 Lee St, Cambridge, MA: Pugh-Roberts Associates.
 240. Quesnel, G.; Ramat, E.; Duboz, R. y Mamadou K. (2007). *VLE: a multimodeling and simulation environment*. Conference: Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference, SCSC 2007, San Diego, California, USA, July 16-19, 2007. Disponible en [fecha de último acceso 05-07-2016] https://www.researchgate.net/publication/221112915_VLE_a_multimodeling_and_simulation_environment.
 241. Raffo, E. (1999). *Software de simulación*. Industrial Data Vol. 2, N° 1, 1999. Páginas 57-60. Disponible en [fecha de último acceso el 16-10-2016] http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/Vol2_n1/pdf/software.pdf.
 242. Reilley, E.D. (2003). *Milestones in Computer Science and Information Technology*. Greenwood Press, Westport – USA. 380 Páginas. ISBN 1-57356-521-0.
 243. Reitman, J. (1971). *Computer simulation applications*. New York: Wiley. 422 Páginas. DOI: 10.1002/spe.4380040413View
 244. Rice, S.V.; A. Marjanski, Markowitz, H.M. y Bailey, S.M. (2005). *The SIMSCRIPT III programming lenguaje for modular onject- otiented simulation*. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference (editado por M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.) pp: 621-630. Disponible en [fecha de último acceso 22/01/2017] http://www.simscript.com/docs/SIMSCRIPT_III_Paper_Win_Sim.pdf
 245. Richardson, G.P. y Pugh, A.L.-III (1981). *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*. Portland OR: Productivity Press. 424 pp. ISBN-10: 1883823439. ISBN-13: 978-1883823436

-
246. Rizzoli, A. (2009). *A collection of modelling and simulation resources on the internet*. Disponible en [fecha de último acceso el 24-11-2016] <http://people.idsia.ch/~andrea/sim/simtools.html>.
247. Rockwell (2016). *ARENA v15 Features*. Rockwell Automation© ARENA Simulation Software. [Fecha de último acceso 25-01-2017]: Disponible en [fecha de última consulta 15-10-2016] <http://info.arenasimulation.com/v15-features-release>
248. Rodríguez, L. E. y Rubén-Quesada, C. M. (2009). *La simulación computarizada como herramienta didáctica de amplias posibilidades*. Revista Cubana de Informática Médica Numero 1, Año 9. (2009) (ISSN:1684-1859). Disponible en [fecha de último acceso 17-06-2016]. http://www.rcim.sld.cu/revista_18/articulos_html/simulacioncomputarizada.htm.
249. Ross, W.; Ulieru M. y Gorod, A. (2014). *A multiparadigm modelling and simulation approach for system of systems engineering: A Case Study*. 9th International Conference on System of Systems Engineering (SOSE), 2014. Disponible en [último acceso en 15/06/2015] en <http://www.theimpactinstitute.org/Publications/A%20Multi-Paradigm%20M&S%20Approach%20for%20SoSE.pdf>.
250. Rossetti, M. D. (2010). *Simulation Modeling with Arena*. Editorial John Wiley & Sons, Inc., 2010. (744 páginas) ISBN: 978-1-118-60791-6.
251. Rusell, E.C. (1989). *Building Simulation Models with SIMSCRIPT II-5*. CACI Products Co. La Jolla CA.
252. Rusell, E.C. (1991): *SIMPSCRIPT II.5 and MODSIM II.5: A brief Introduction*. Proceedings of the 23rd Winter Simulation Conference – Año 1991. IEEE Computer Society Washington, DC, USA ©1991. Editado por B. Nelson, W.D. Kelton y G.M. Clark. Páginas 62-66. ISBN:0-7803-0181-1. Disponible en [fecha de último acceso el 03-08-2016] http://informs-sim.org/wsc91papers/1991_0009.pdf.
253. Schmidt, J. y Taylor R. (1970). *Simulation and analysis of industrial Systems*. Homewood IL: Irwin (series in quantitative analysis for business). ISBN-10: 3537878168. ISBN-13: 978-3537878168
254. Schriber, T.J. (1974). *Simulation using GPSS*. New York: Wiley. ISBN 9780471763109.
255. Schriber, T.J. (1995). *Perspectives on Simulation using GPSS*. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference (ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W.R.Ligegdon y D. Goldsman). (pp: 451- 456). Disponible en [fecha de acceso el 12-01-2017]

https://www.researchgate.net/publication/221525487_Perspectives_on_simulation_using_GPSS

256. Schriber, T.J.; Cox, S.; Henriksen, J.; Lorenz, P.; Reitman, J. y Ståhl, I. (2001). *GPSS Turns 40: Selected Perspectives*. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, editado por B. Peters, J. Smith, D. Madeiros and M. Rohrer pp: 565-576. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 15-01-2017] <http://simulation.su/uploads/files/default/2001-schriber-lorenz-cox-reitman-henriksen-stahl.pdf>
257. Schriber, T.J.; Banks, J.; Seila A.F.; Ståh, I. Law, A.M. y Born, R. (2003). *Simulation text books. Old and New (Panel)*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, eds. pp: 1952-1963. Disponible en [fecha de último acceso el 25-01-2017] <http://www.informs-sim.org/wsc03papers/253.pdf>
258. Schwetman, H. D. (1986). *CSIM: A C-Based Process-Oriented Simulation Language*. Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference. Editado por J.R. Wilson, J.O. Henriksen y S.D. Roberts. Páginas 387- 396. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] http://www.informs-sim.org/wsc86papers/1986_0059.pdf
259. Schwetman, H. D. (1988). *Using CSIM to model complex systems*. Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference. Editado por M. Abrams, P. Haigh y J. Comfort. Páginas 246- 253. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] http://informs-sim.org/wsc88papers/1988_0036.pdf
260. Schwetman, H. D. (1990-a). *Introduction to process-oriented simulation and CSIM*. Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference. Editado por O. Balci, R.P. Sadpwski y R.E. Nance. Páginas 154- 157. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] http://www.informs-sim.org/wsc90papers/1990_0029.pdf.
261. Schwetman, H. D. (1990b). *CSIM Reference Manual (Revision 14)*. Technical Report ACA-ST-257-87. Microelectronics and Computer Technology Corporation, Austin (Texas, USA). Disponible en Proceedings de la 22nd conference on Winter simulation. Pages 154-157 y en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.56.6808&rep=rep1&type=pdf>
262. Schwetman, H. D. (1995). *Object – Oriented simulation modeling with C++/CSIM17*. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference. Editado por C. Alexopoulos, K. Kang, W.R. Lilegdon y D. Goldsman. Páginas 529-533. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] http://www.informs-sim.org/wsc95papers/1995_0082.pdf.

-
263. Schwetman, H. D. (1996). *CSIM18 – The simulation engine*. Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference. Editado por J.M. Charnes, D.J. Morrice, D.T. Brunner y J.J. Swain. Páginas 517-521. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/073.pdf>.
264. Schwetman, H. D. (2005). *Technical Note - Processes in CSIM for Java*. Mesquite Software Newsletter Volume 3 - Fall 2005. Mesquite Software, Inc. (Austin, Texas) Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <http://www.mesquite.com/newsletter/newsletter-v3.php#technote>.
265. Schwetman, N. (2009). *CSIM: Products / FAQ*. Mesquite Software Newsletter Volume 10 – Summer 2009. Mesquite Software, Inc. (Austin, Texas) Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <http://www.mesquite.com/newsletter/>.
266. Selwyn, B. (2008). *Bringing social relations back in (re)conceptualising the 'Bullwhip Effect' in global commodity chains*. International Journal of Management Concepts and Philosophy, Volumen 3, número 2. Páginas 156-175. Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) <http://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IJMCP.2008.021272>.
267. Shannon, R. E. (1975). *Systems simulation: the art and science*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 368 Páginas. ISBN-10: 0138818398 / ISBN-13: 978-0138818395. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 03-11-2016] https://www.researchgate.net/publication/44460843_Systems_simulation_the_art_and_science_Robert_E_Shannon
268. Siebers, P.O.; Macal, C.M.; Garnett, J., Buxton, D. y Pidd, M. (2010). *Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation!*. Journal of Simulation nº 4 - 2010, páginas 204–210. doi:10.1057/jos.2010.14. Disponible en (fecha de último acceso 22/11/2016) <http://www.palgrave-journals.com/jos/journal/v4/n3/full/jos201014a.html>) y <http://www.cs.nott.ac.uk/~pos/docs/pos-JOS-2010-2.pdf>
269. SIMIO (2010). *SIMIO Release Notes*. Simio LCC. Sewickley (Pittsburgh, Pensilvania, Estados Unidos). Recurso en línea. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017] <http://www.simio.com/downloads/public/software/SimioReleaseNotes49.pdf>
270. SIMIO (2016). *SIMIO: Port Simulation Software*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pensilvania, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016] <http://www.simio.com/applications/port-simulation-software/>
271. SIMIO (2017a). *SIMIO Forward Thinking*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pensilvania, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://www.simio.com>

-
272. SIMIO (2017b). *SIMIO 7. SIMIO leads the way*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pensilvania, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 10.10.2017] https://www.simio.com/resources/release-notes/notes/version_7_summary.php
273. SIMSCRIPT (2016). *SIMPSCRIPT: Modelling and Simulation Tools*. CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (USA) Disponible en [fecha de ultimo acceso el 03-11-2016] <http://www.simscrip.com/>
274. Sklenar, J. (1997). *Introduction to OOP in SIMULA*. Documento de trabajo no publicado Disponible en [fecha de ultimo acceso el 25.10.2016] http://staff.um.edu.mt/jskl1/talk.html#History_67
275. Ståhl, I. (1992). *Animation with micro-GPSS and proof*. Volumen 6467 de Ekonomiska forskningsinstitutet vid Handelshögskolan i Stockholm - EFI. 12 páginas
276. Ståhl, I. (2001). *GPSS – 40 years of Development*. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, editado por B. Peters, J. Smith, D. Madeiros y M. Rohrer, (pp 577-585). Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Disponible en [fecha de última consulta el 15-01-2017] https://www.researchgate.net/publication/3933170_GPSS-40_years_of_development
277. Ståhl, I.; Henriksen, J. O.; Born, R. G. y Herper, H. (2011). *GPSS 50 yeras old, but still Young*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspace, K.P. White, and M. Fu, eds.). pp: 3952 – 3962. Disponible en [fecha de ítimo acceso 15/01/2017] <http://www.informs-sim.org/wsc11papers/351.pdf>.
278. Standridge, C.R. y Pritsker, A.A.B. (1987). *TESS: The Extended Simulation Support System*. Halsted Press, John Wiley & Sons, New York.
279. Starbuck, W. (1983). *Computer simulation of human behavior*. Systems Simulation and Behavioral Science. Volume 28, Issue 2 (Abril1983). Páginas 154–165. DOI: 10.1002/bs.3830280207 Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/227631355_Computer_simulation_of_human_behavior
280. Stone, H.S. (1972). *Introduction to computer organization and Data Structures*. MacGraw-Hill, Nueva York (1971, ©1972). 321 Páginas. ISBN:0070617260.
281. Stroustrup, B. (2010). *C++ Programming Language- 3th Edition*. Publicado por Addison-Wesley Professional (11 de febrero de 2010). 1030 páginas. ISBN-10: 9780201700732 e ISBN-13: 978-0201700732.

-
282. Stroustrup, B. (2013). *C++ Programming Language- 4th Edition*. Publicado por Addison-Wesley Professional (9 de mayo de 2013). 1368 páginas. ISBN - 13 978-0321563842 e ISBN-10: 0321563840.
283. Stroustrup, B. (2014). *Programming: Principles and Practice Using C++ (2nd Edition)*. Publicado por Addison-Wesley Professional (25 de mayo de 2014). 1312 páginas. ISBN-10: 0321992784 e ISBN-13: 978-0321992789.
284. Sun, H.X. y Ren, Y.T. (2005). *The impact of forecasting methods on bullwhip effect in supply management effect*. Engineering Management Conference, 2005. Proceedings. 2005 IEEE International, Volumen 1. Páginas 215 a 219 Disponible en (fecha de último acceso el 12.12.2016) <http://www-scf.usc.edu/~yingtaor/publications/BullwhipEffect.pdf>.
285. Sweetser, A. (1999). *A comparison of System Dynamics (SD) and Discrete Event Simulation (DES)*. Proceedings of the 17th International Conference of the System Dynamics Society and 5th Australian & New Zealand Systems Conference (1999). Disponible en [fecha de última consulta 18/10/2016] <http://www.systemdynamics.org/conferences/1999/PAPERS/PARA78.PDF>
286. System Dynamics Society, (2016). *System Dynamics*. Universidad de Albany, SUNY Albany, NY 12222, USA. Disponible en [fecha de última consulta 29-06-2016]: <http://www.systemdynamics.org>
287. Tako, A. y Robinson, S. (2006). *Towards An Empirical Comparison of Discrete-Event Simulation and System Dynamics in the Supply Chain Context*. Proceedings of the 2006 OR Society Simulation Workshop, S. Robinson, S. Taylor, S. Brailsford and J.Garnett, eds
288. Tako, A. y Robinson, S. (2009a), *Comparing discrete-event simulation and system dynamics: users perceptions*. The Journal of the Operational Research Society, vol. 60 (nº3): pp: 296-312. (ISSN 0160-5682)
289. Tako, A. y Robinson, S. (2009b) *Comparing model development in discrete event simulation and system dynamic*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, pp: 979 -991.
290. Tako, A., Robison S. y Ingalls, R.G. (2009). *Comparing model development in Discrete Event Simulation and System Dynamics*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Páginas 979-991. Disponible en [fecha de última consulta 18/11/2016] <http://www.informs-sim.org/wsc09papers/093.pdf>
291. Tako, A. y Robinson, S. (2010). *Model development in discrete-event simulation and system dynamics: An empirical study of expert modellers*. European Journal of Operational

-
- Research. Volumen 2017, nº2, Diciembre 2010. Páginas 784-794. Disponible en (fecha de ultimo acceso el 12.12.2016) en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221710003668>
292. Tako, A. y Robisson, S. (2011). *The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context*. Decision Support Systems. Volumen 52, nº4. Páginas 802-815. Disponible en (fecha de ultimo acceso el 12.12.2016) en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923611002211>.
 293. Takus, D.A. y Profozich, D. M. (1997). *Arena ® Software Tutorial*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Pp: 541-544 (1997). Disponible en [fecha de último acceso el 03-12-2016] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0541.PDF>.
 294. Tempelmeier, H. (2006). *Inventory Management in Supply Networks—Problems, Models, Solutions*. Norderstedt - Books on Demand 1st Edition. 312 Páginas. ISBN-10: 3833453737 y ISBN-13: 978-3833453731.
 295. Tocher, K. D.y Owen, D. G. (1960). *The automatic programming of simulations*. Proceedings of the Second International Conference on Operational Research (Editado por J. Banbury y J. Maitland. The English Universities Press Ltd., London). pp: 50–68.
 296. Tocher, K.D. (1962). *The art of simulation*. English University Press. 184 páginas . ISBN 10: 0340114525.
 297. Torgersson, O. (1996) . *Note on Declarative Programming Paradigms and the Future of Definitional Programming* Department of Computing Science. Chalmers University of Technology and Göteborg University. Disponible en [fecha de última consulta el 25-10-2016] <http://www.cse.chalmers.se/~oloft/Papers/wm96.pdf>.
 298. Turban, E. (1995). *Decision support and expert systems: management support systems*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall. 930 páginas. ISBN 0-02-421702-6.
 299. Ulrich, K.; Straßburger, S. y Beikirch, J. (1998). *Distributed simulation with JavaGPSS based on the High Level Architecture*. Simulation Series 30. Páginas 85-90. Disponible en [fecha de último acceso el 22-07-2016] <http://www.strassburger-online.de/papers/WebSimJavaGPSS.pdf>
 300. Ursavas, E. (2014). *A Decission Support System for quayside operations in a container terminal*. Decission Support Systems 59 (2014). Páginas 312-314. Editado por Elsevier. Disponible en [fecha de último acceso el 04-11-2016]

https://pdfs.semanticscholar.org/d856/fbb3f26159cb936a9d5c047161631bcc561e.pdf?_ga=1.141350193.2090556174.1478134489

301. Vaca, C. (2011). *Paradigmas de programación*. Departamento de Informática. Universidad de Valladolid. Disponible en [fecha de último acceso el 01.05.2017] <http://www.infor.uva.es/~cvaca/asigs/docpar/intro.pdf>.
302. Vangheluwe, H.; Lara, J. y Mosterman, P. (2002). *An introduction to multiparadigm modeling and simulation*. Artificial Intelligence and Simulation. Presentado por Vangheluwe, H. en Proceedings of the AIS'2002 Conference 9–20 (2002). Disponible en [fecha de último acceso el 04-11-2016] <http://www.cs.mcgill.ca/~hv/publications/02.AIS.campam.pdf>.
303. Vignaux, T. (2002). *SIMSCRIPT II.5® Simplified*. CACI Products Company. San Diego, California (USA). 39 páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 08-07-2016] http://www.caciasl.com/cust_center/ss3docs/SimscriptSimplified.pdf
304. Villareal G.L.; De Giusti M.R. y Texier, J. (2012). *GPSS Interactive Learning Environment*. Procedia - Social and Behavioral Sciences 00 (2012). Disponible a la fecha de publicación en Disponible en [fecha de última consulta 15-01-2017] <http://www.slideshare.net/SeDiCI-UNLP/gpss-interactive-learning-environment>
305. Villareal, G.L. (2013). *GPSS Interactive Learning Environment*. The Online Journal of new Horizons in Education. Vol. 3, Issue 1: pp: 32-39. Jan. 2013. ISSN 2146-7374.
306. Wikipedia – Analytica (2016). *Analytica (software)*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] [https://en.wikipedia.org/wiki/Analytica_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Analytica_(software))
307. Wikipedia - CC (2016). *Concurrent Computing*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Concurrent_computing.
308. Wikipedia – DSL (2016). *Domain-specific language*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Lenguaje_espec%C3%ADfico_del_dominio.
309. Wikipedia - Java (2016). *Java (lenguaje de programación)*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Java_%28lenguaje_de_programaci%C3%B3n%29.

-
310. Wikipedia - JOSS (2013). *JOSS: JOHNNIAC Open Shop System*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 22-01-2017] <https://es.wikipedia.org/wiki/JOSS>
 311. Wikipedia – PG (2016). *Programación Genérica*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_gen%C3%A9rica
 312. Wikipedia – RP (2016). *Reactive Programming*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Reactive_programming
 313. Wikipedia – Simula (2016). *Simula*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] <https://es.wikipedia.org/wiki/Simula>
 314. Wikipedia IGU (2016). *Interfaz Gráfica de Usuario*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz_gr%C3%A1fica_de_usuario.
 315. Wikipedia OOP (2016) *Programación Orientada a Objetos* Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_orientada_a_objetos.
 316. Wikipedia PDE (2016). *Programación Dirigida a Eventos*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de último acceso 15-01-2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_dirigida_por_eventos.
 317. Wilson, J. y Goldsman D. (2001). *Alan Pritsker's multifaceted career: theory, practice, education, entrepreneurship, and service*. IIE Transactions (2001) 33, pp: 139-147. Disponible en [fecha de último acceso el 25.01.2017] <http://www.ise.ncsu.edu/jwilson/files/pritsker-iiet-article.pdf>
 318. Wilson, J. (2011). *Philip J. Kiviat Papers 1962-2010 (bulk 1962-1972)*. Philip J. Kiviat Papers, MC 00429, Special Collections Research Center, North Carolina State University Libraries, Raleigh, NC. Accesible bajo petición en [fecha de ultimo acceso el 22-01-2017] <http://www.lib.ncsu.edu/findingaids/mc00429/>
 319. Wolverine Software Corporation (s/f). *Comparison of SLX and GPSS/H for experienced GPSS/H Users*. Editado por Wolverine Software Corporation. Disponible en [fecha de último acceso el 23-07-2016] <http://www.wolverinesoftware.com/slxxvsh.pdf>

-
320. Wood, B. y Tumay K. (1999): *Modsim III and CACI's applications*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference – Año 1999. Editado por P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans. Páginas 234 – 238. Disponible en [fecha de último acceso el 03-08-2016] http://www.informs-sim.org/wsc99papers/032.PDF?origin=publication_detail.
321. WSC (2014). *The Winter Simulation Conference: The Premier Forum on Simulation Practice and Theory*. Winter Simulation Conference. Disponible en [fecha de última descarga 03-07-2016] <http://www.wintersim.org/2015/images/WSCHistory.pdf>
322. Wyman, F. P. (1970). *Simulation modeling: a guide to using SIMSCRIPT*. New York: Wiley (Wiley series in management and administration). 227 Páginas
323. Zeigler., B. (1976). *Theory of modeling y simulation*. New York: Wiley. ISBN 0-12-778455-1.
324. Zeigler, B. P.; Praehofer, H. y Kim, T. G. (2000). *Theory of Modelling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. Academic Press, Auflage 2ª edition. 510 páginas. ISBN-10: 0127784551 y ISBN-13: 978-0127784557.
325. Zhang, X. (2004). *The impact of forecasting methods on bullwhip effect*. International Journal of Production Economics. Volumen 88, nº1, (8 de marzo 2004). Páginas 15–27 Disponible en (fecha de último acceso el 12.10.2016) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527303001282>
326. Zupick, N. (2016). *Solving Agent Based Problems with Arena*. Arena © Simulation Software. Rockwell Automation. Disponible en [fecha de último acceso el 18-10-2016] <https://www.arenasimulation.com/support/entry/solving-agent-based-problems-with-arena>.

Capítulo 2

Uso de modelos y simulación en entornos portuarios: evolución y clasificación

2.1 Introducción a la modelización portuaria. Simulación versus procedimientos analíticos.

Los puertos son estructuras muy complejas en los que muchos factores interactúan entre sí. En este tipo de sistemas las técnicas de simulación encuentran, como complemento a los métodos puramente analíticos, un campo de aplicación preferente.

Siendo así, las técnicas de modelización y simulación son seguramente las más extendidas hoy en día dentro del campo de gestión portuaria para realizar análisis de optimización, estudios de cierto grado de detalle o de gran complejidad, habiendo sido utilizadas en un amplio espectro de campos prácticos que van desde la determinación del número óptimo de atraques; decisiones de inversión en nuevo equipamiento; programación de llegada de buques y asignación óptima de atraques; asignación, dimensionamiento u optimización de recursos (grúas, medios de manipulación, etc.); simulación del impacto de diferentes políticas de gestión de una terminal en la productividad de la misma; evaluación de políticas comerciales; planes de contingencia y gestión de riesgos; análisis de capacidades, determinación de la demanda y proyecciones de tráfico, estudios de impacto ambiental y de evaluación ambiental estratégica, etc.

En efecto, mediante la construcción de un modelo portuario se puede representar la interacción y comportamiento en un puerto/terminal de todos sus elementos (barcos, muelles, grúas, elementos de manipulación de mercancías, remolcadores, estibadores, etc.) y mediante un ejercicio de simulación una vez construido el modelo es posible predecir cómo se comportará y medir su rendimiento mediante la monitorización de adecuados parámetros (tiempos de espera, retrasos, grados de ocupación, productividades, costes, etc.) antes de su construcción o ante cambios impuestos en el mismo; por ejemplo, construcción de un nuevo muelle, dotación de una nueva grúa, cambio en las políticas de asignación de medios en las cargas/descargas, estrategias de almacenamiento en parques, planes de estiba óptimos, etc.

La potencia y aplicabilidad de la modelización en la gestión portuaria es advertida ya por la UNCTAD cuando en el año 1969 lanza el primer modelo de propósito especial para puertos, y más tarde por el Banco Mundial cuando 5 años después lanza el segundo (conocido como PORTSIM y datado en 1974).

Ya en la década de los 80, Collier (1980) presenta la simulación como un elemento de ayuda esencial para el estudio de sistemas portuarios en su artículo con el sugerente título “*Simulation as an aid to the study of a port as a system*”.

A principios de la década de los 90 la simulación en entornos portuarios había alcanzado una diversificación notable y eran muchos los ejemplos de aplicación práctica implementados. Esto es lo que lleva a Hassan (1993) a proponer un análisis y resumen del estado del arte bajo el atractivo título de *“Port activity simulation: An overview”*.

En efecto, la simulación puede enriquecer los estudios y ampliar el campo de aplicación de los procedimientos analíticos clásicos (teoría de colas, métodos de índices de explotación, ábacos de dimensionamiento, etc.) cuando la complejidad del problema que se quiere resolver es elevada (de tal manera que encontrar soluciones con los métodos analíticos es inabordable o simplemente imposible), el nivel de detalle requerido muy exigente o las peculiaridades del puerto/terminal obligan a alejarse de soluciones “tipo” proporcionadas por esos medios generalistas.

Sin embargo, no todo son ventajas en los modelos portuarios. Si se acepta a todo un clásico en planificación portuaria y defensor de la utilización de modelos en puertos como es Frankel (1987), una de las limitaciones que suelen achacarse a los modelos de simulación portuarios es que los resultados, usualmente, no indican que cambio en los *inputs* producen la/s mejora/s más relevantes en los resultados, por lo que suele ser difícil realizar tests de sensibilidad sobre estas herramientas.

Adicionalmente existe un innegable efecto de “caja negra” en los modelos de simulación por el cual se conocen sus resultados pero no los pasos o forma de cálculo para llegar a ellos que sólo son conocidos por su programador.

Lo que se puede deducir de lo señalado por Frankel (1987) es que, a través de un modelo de simulación, no se encuentra una solución determinista a preguntas del tipo:

- ¿qué inversión debería realizar para reducir a la mitad el tiempo de descarga o aumentar el doble el rendimiento del puerto?;
- ¿qué equipamiento produce el mejor resultado en términos de productividad?;
- ¿cuál es la mejor configuración portuaria en términos de rendimiento del puerto?.

Mediante la simulación se deben de experimentar diferentes escenarios (situaciones con diferentes *inputs*) y a través de los resultados obtenidos llegar a las conclusiones que se estén buscando. Con ello, se puede encontrar la mejor de entre las soluciones que se ensayan, lo cual, no necesariamente implica que sea la mejor de todas las soluciones posibles. La experiencia del modelador y su habilidad en testar las mejores soluciones, cobra una especial importancia, de tal modo que la aplicación de estos métodos sea la más correcta y la simulación produzca unos resultados valiosos acercándonos al óptimo.

Si bien no deja de ser cierto lo expresado por Frankel, el efecto de “*caja negra*” es, sin embargo, más acusado en unos que en otros modelos, y los problemas se han ido resolviendo con la propia evolución de la técnica, como más adelante se pondrá de manifiesto y, sobre todo, con la aplicación de herramientas de visualización o animación en los modelos.

Adicionalmente, debe señalarse que suelen ser procedimientos más costosos de implantación y en muchos casos más largos que otros procedimientos analíticos, por lo que su aplicación debe estar adecuadamente prescrita.

No obstante, este autor sigue afirmando que se puede constatar que es prácticamente la única herramienta que proporciona resultados efectivos de productividad portuaria sobre la base de datos reales (*inputs* de entrada), y que es el único método capaz de generar resultados significativos en sistemas complejos o insuficientemente conocidos; lo que sin duda, les confiere mucha potencia y claras ventajas sobre otros métodos.

Sinérgicamente, una vez desarrollados los modelos, permiten a bajo coste explotar diferentes escenarios y, lo que aún es más importante, se pueden implantar como un instrumento de ayuda permanente al gestor portuario y por tanto configurarse como un elemento esencial dentro de las herramientas de apoyo a las decisiones operativas tal como indican Thiers y Janssens (1998). Estos son los DSS (“*Decision Support Systems*”), TOR (“*Terminal Operating Systems*”) o TMS (“*Terminal Management Systems*”) que son objetos de discusión en otros puntos de esta tesis y se tratarán más adelante.

En efecto, una vez contruidos y calibrados los modelos pueden explotarse continuamente para evaluar diferentes decisiones de inversión y/o operativas, siendo una herramienta de confianza en la que basar decisiones diarias de carácter operativo (como por ejemplo qué medios asignar a cada operación o como programar las operaciones) o decisiones de carácter táctico u operativo (como por ejemplo qué inversiones ejecutar y el momento idóneo para abordarlas).

En este sentido Hayuth *et al.* (1994) incluyen unas ideas básicas de cómo construir un simulador portuario que responda a éstas u otras preguntas. En concreto, estos autores analizan los requerimientos de software y hardware para un modelo de simulación portuaria y proponen un modelo programado en lenguaje C que era capaz de incorporar diversos patrones de llegada de buques, composición de flotas y parámetros de productividad con la novedad a la fecha de ser capaces de tratar conjuntamente la coordinación de dos terminales (los autores indican que es el primer caso conocido en que este tema es tratado).

En este caso, el acoplamiento de modelos de simulación con herramientas de análisis de datos y/o con técnicas de planificación y gestión derivadas de investigación operativa e inteligencia

artificial constituyen verdaderos sistemas de ayuda a la decisión o DSS como se les conoce en la literatura anglosajona y como los abordan, entre otros, Gambardella *et al.* (1998), Murty *et al.* (2000), Wang *et al.* (2011) y van Vianen *et al.* (2012c) para el caso portuario; o Shen y Khoong (1995), y Bandeira *et al.* (2009), para el caso específico de gestión de contenedores vacíos.

2.2 Clasificación “macro” de modelos portuarios.

Recuperando los conceptos previos que se han analizado en el capítulo primero, se expondrán brevemente en este apartado los modelos portuarios bajo diferentes criterios de clasificación. Todos ellos se desarrollarán en mayor profundidad en los apartados posteriores. Los criterios de clasificación general que se van a utilizar son:

- Por su grado de especialización. Modelos de propósito especial portuario y modelos de propósito general aplicados en entornos portuarios. Con carácter general esta división será tratada en el apartado 2.2.1. Los primeros serán objeto de un apartado específico con mayor grado de desarrollo en el apartado 2.3, mientras que los segundos serán discutidos con mayor detalle en el punto 2.4.
- Por la tipología de modelización. Modelos portuarios sobre lenguajes de programación, utilizando lenguajes de simulación o empleando simuladores. Este aspecto será ampliado con posterioridad en el punto 2.2.2.
- Por el propósito del modelo. Modelos operacionales, tácticos y estratégicos. Esta división, clásica y específica de entornos portuarios es tratada por muchos autores y será ampliada en el punto 2.2.3.
- Por su grado de integración (con respecto a procesos de optimización). Modelos integrados, también llamados por algunos autores como Saccone y Siri (2009) “*optimization-based models*”; versus modelos no integrados, denominados por estos mismos autores como “*operational research models*”. Se volverá sobre este criterio de clasificación con más grado de detalle en el punto 2.2.4.
- Por el paradigma de programación. Modelos de eventos discretos ("DES"), basados en agentes ("ABS"), modelización bajo sistemas dinámicos ("SD") y modelos multiparadigma por combinación de los anteriores que operan en diferentes niveles o capas de la arquitectura de la modelización. Este punto será ampliamente discutido en el punto 2.2.5. Por la relevancia de

esta clasificación se dedicará un capítulo específico (capítulo 3) a estos modelos, con apartados concretos a los modelos DES (capítulo 3.2), ABS (capítulo 3.3) y SD (capítulo 3.4).

- Modelos por el número y tipos de problemas que quieren resolver. Aquí, el número de subtipologías es mucho más grande y se pueden encontrar problemas que se centran en la resolución individual o aislada de un problema concreto; los que tratan de resolver de una manera combinada dos o más problemas individuales; y, finalmente, los que tratan la problemática portuaria desde una visión integral o global incidiendo en todos los elementos del puerto.
 - Por citar algunos ejemplos de problemas individuales se podrían destacar, entre otros, aquellos que tratan de resolver únicamente la asignación de atraque o “BAP” (*“Berth allocation problem”*); los que se centran en la asignación de grúas o “QCAP” (*“Quay crane allocation problem”*); los que inciden solamente en la programación de grúas o “QCSP” (*“Quay crane schedulling problem”*); aquellos otros que tratan de planificar la estiba o planes de carga de buque o “SPP” (*“Stowage planning problem”*); los que se centran en las estrategias de operación en el parque, incluyendo entro otros las políticas de asignación de grúas pórtico en parque o “YCAP” (*“Yard crane allocation problem”*) o programación de estas grúas o “YCSP” (*“Yard crane allocation problem”*); etc.
 - Como se ha señalado, los enfoques combinados resuelven a la vez dos o más problemas en el mismo modelo (por ejemplo, el BAP junto con el QCAP) y los enfoques globales integran toda la operativa portuaria.

Sin duda, esta última es la clasificación más extendida en el mundo portuario y se pueden encontrar numerosas referencias bibliográficas bajo el uso de los acrónimos en inglés, algunos de cuyos ejemplos se han citado con anterioridad. Siendo una clasificación exclusiva y ampliamente extendida en el mundo portuario, se dedicará un apartado específico de esta tesis para su desarrollo (apartado 2.4.2.).

De igual modo, como cierre de este apartado y punto de partida del siguiente se puede decir que, usualmente, en los modelos de simulación portuarios se utiliza el tiempo como variable independiente siendo modelos dinámicos y estocásticos tal y como se han definido con anterioridad; si bien, conforme Frankel (1987), éste no es el único procedimiento (o en según qué casos el más acertado) que se puede implantar según las características del evento experimental o realidad que se quiera abordar, aspecto que debe ser tenido siempre presente.

La introducción de otros paradigmas de programación como ABS o SD son discutidos en el capítulo 3 de la presente tesis doctoral, junto con otros entornos de simulación no estrictamente computacional como los modelos físicos (prototipos) o los modelos de emulación.

2.2.1 Modelos portuarios por su grado de especialización. Modelos de propósito especial y modelos de propósito general aplicados en entornos portuarios.

En el campo científico de la simulación se puede distinguir entre métodos de propósito especial (desarrollados específicamente para un sector) y métodos de propósito general (construidos sobre una base científica común a cualquier área de actividad, que se adaptan “*ad hoc*” al campo que se trata).

Esto no es ajeno al universo portuario y mientras algunos organismos, instituciones o casas comerciales han desarrollado software específico para su utilización en terminales portuarias, otros investigadores o consultores han preferido programar directamente sus modelos portuarios utilizando herramientas de carácter general por la mayor flexibilidad que éstas le conferían.

Diferentes ejemplos de modelos de propósito especial para puertos se encuentran recopilados en el apartado 2.3. Allí se observan dos etapas históricas distintas. La primera (durante los años 70 y 80) con un carácter más institucional (son organismos públicos los que se encargan de desarrollar las herramientas) y la segunda (desde el año 90 en adelante) donde el sector privado toma un mayor interés y son empresas especializadas en software y soluciones de simulación las que empiezan a comercializar herramientas específicas para su aplicación en entorno portuario.

Dentro de la primera etapa se encuentra un primer modelo desarrollado por la UNCTAD¹⁰⁵ en 1969 y un segundo lanzado del Banco Mundial (PORTSIM) de 1974. A estos siguen, más de una década después, otros como el del MIT (Port Simulator, 1987).

Desde entonces, estos organismos abandonan estos proyectos y son varias las librerías o extensiones específicas de software comercial de simulación específicamente diseñadas para la gestión portuaria (usualmente en el ámbito de las terminales de contenedores) que se comercializan por empresas privadas.

¹⁰⁵ UNCTAD (de *United Nations Conference on Trade and Development*) es una institución intergubernamental establecida en 1964 dentro de las Naciones Unidas.

Aplicaciones prácticas de propósito general son recogidas en el apartado 2.4, donde se citan tanto modelos escritos en códigos de lenguajes de programación como C++, Fortran, Pascal o Java; como autores que han utilizado lenguajes de simulación como SIMAN o GASP, u otros que han montado su arquitectura aprovechando las ventajas que les otorgan los simuladores de propósito general.

2.2.2 Modelos portuarios por la tipología de modelización. Lenguajes de programación, lenguajes de simulación y simuladores en entornos portuarios.

Como se acaba de apuntar, de la extensa revisión bibliográfica que se ha realizado, se puede observar como existen tanto aplicaciones prácticas directamente desarrolladas sobre lenguajes de programación (usualmente construyendo modelos *ad hoc* para una terminal y puerto muy específico bajo unas condiciones de experimentación muy concretos), como lenguajes de simulación, simuladores o paquetes de simulación.

Los lenguajes de programación proporcionarán un rico marco conceptual sobre los problemas que pueden ser estudiados bajo estas técnicas y, como se discutirá un poco más adelante, han dado cuerpo a una extraordinaria producción científica y no menos profusos ejemplos de aplicación práctica, dividiéndose los problemas en diferentes subtipologías (BAP, QCAP, YCAP, etc.), desarrollados en el apartado 2.4.2.1 y utilizándose diferentes técnicas o algoritmos de resolución (apartado 2.4.3).

Sin embargo, es necesario también destacar el papel que los simuladores (más que los lenguajes de programación) han adquirido en los últimos tiempos y cómo, mediante la utilización de paquetes comerciales específicos y el acoplamiento de interfaces de salida y visualización, el gestor portuario cuenta con una herramienta muy potente para el análisis y posterior difusión de resultados técnicos a todo tipo de público. Estos han permitido que directamente especialistas en gestión portuaria (no necesariamente programadores) hayan introducido este campo en esta industria.

En el apartado 2.4.4.2 se presenta un amplio conjunto de referencias bibliográficas de diferentes autores que han utilizado simuladores de tipo comercial, que se resumen en una tabla donde se presentan ejemplos prácticos clasificados por la herramienta utilizada y donde se observa como cierto software, sobre todo, *ARENA®*, *WITNESS®*, *MODISM®*, *FLEXSIM®* o *AWESIM®* han sido ciertamente exportadas con éxito al campo portuario (véase la tabla 10).

2.2.3 Modelos portuarios por su propósito. Modelos operacionales, tácticos y estratégicos.

Hoy existe cierto consenso en el ámbito de la gestión portuaria de clasificar también los modelos portuarios en función del propósito del modelo.

Probablemente los primeros investigadores que introducen una clasificación pormenorizada bajo este criterio son Dekker *et al.* (2006). Estos autores proporcionaron una clasificación de los modelos de simulación portuaria¹⁰⁶ que dividen en aquellos que tratan de resolver cuestiones de naturaleza estratégica (decisiones de largo plazo), aquellos otros que se centran en la resolución de problemas de naturaleza táctica (problemas que conciernen a la capacidad de la terminal en medio plazo) y problemas de naturaleza operacional (enmarcados en el corto plazo en base incluso diaria) y engloban los diferentes subproblemas (BAP, QCSP, etc.,) en cada uno de estos grupos.

- Los modelos estratégicos corresponden al diseño o configuración de una terminal en cuanto a número de muelles, superficies necesarias o tipo de equipamiento. Se resuelven con este tipo de modelos problemas en cuanto a decisiones de inversión de expansión portuaria o configuración (*layout*) óptima del mismo.
- Los modelos tácticos se centran en aspectos tales como las políticas de colocación y ordenación de espacios, remociones de contenedores, gestión de contenedores vacíos, reclasificación de contenedores, etc. Dicho de otro modo, sobre una infraestructura y equipamiento existente se optimiza la operación mediante la utilización de los modelos, investigando aspectos de decisión que afectan a medio plazo.
- Por su parte, los modelos operacionales tienen que ver, por ejemplo, con la asignación de *slots* a los contenedores y sus movimientos efectivos dentro de patio, la asignación de puesto de atraque y programación de grúas y otros medios de manipulación en la terminal. Bajan por lo tanto a un nivel operacional mayor y proporcionan ayuda en la toma de decisiones con las que diariamente tienen que enfrentarse el operador del puerto o la terminal. Ayudan más a gestionar el día a día que a planificar el futuro.

Cada uno de estos ámbitos (estratégico, táctico u operacional) requiere un grado de detalle diferente y con ello las necesidades computacionales, requisitos en cuanto a arquitectura, grado de simplificación / abstracción, etc. son también diferentes.

¹⁰⁶ La investigación de estos autores se ciñe específicamente al caso de terminales de contenedores pero bien puede ser extrapolable a otros ambientes portuarios (bien a nivel terminal, bien a nivel de puerto global)

Esta clasificación enunciada por Dekker *et al.* (2006) ha sido utilizada con posterioridad por otros autores entre los que cabría destacar Bierwirth y Meisel (2010) y su actualización de Bierwirth y Meisel (2015) quienes abordaron la interrelación entre los diferentes problemas de planificación portuaria y propusieron un esquema matricial de interrelación en el que definían tres zonas especiales (lado mar, lado tierra e interface mar-tierra) y dos niveles de planificación (estratégica y operativa).

Este criterio de clasificación “macro” (planificación estratégica – táctica – operativa) es el que hoy en día, en combinación con la clasificación “micro” dependiendo del problema que trata de resolverse (BAP, QCAP, QCSP, YCSP, ...) encuentra un mayor desarrollo científico en el ámbito de la simulación portuaria.

2.2.4 Modelos portuarios por su grado de integración. Modelos integrados *versus* modelos no integrados.

Otro criterio de diferenciación entre modelos, basados en este caso en un detalle técnico de la arquitectura del modelo más que en un aspecto puramente portuario, es el grado de integración del propio modelo con rutinas de optimización. Con carácter general se puede diferenciar entre:

- Modelos no-integrados en el que los parámetros que sirven para una posterior optimización son prefijados previamente a la simulación y tienen por tanto consideración de parámetros fijos durante el proceso en el que corre el modelo no pudiendo cambiar a lo largo del recorrido del modelo. Por tanto, la optimización se procede sólo corriendo tantas veces el modelo como seamos capaces de hacer una iteración, registrar sus resultados y volver a introducir como *inputs* de la siguiente iteración.
- Los modelos de última generación (coincidiendo con el avance en la capacidad de las computadoras) han integrado los propios módulos de simulación con otros de optimización, de tal modo que una herramienta de más alto, o nivel de simulación; llama a otras subrutinas o nivel optimización, en un nivel más bajo, de tal modo que no hace falta retroalimentar cada iteración con nuevos *inputs* que son proporcionados en una interacción automática. A éstos modelos se les puede llamar modelos integrados.

Sacone y Siri (2009) indican que si bien en la literatura de simulación portuaria se encuentran muchos modelos que trabajan sobre la optimización desde un punto de vista no integrado, muy

pocas referencias se pueden encontrar bajo un enfoque de modelo basado en la optimización¹⁰⁷. Estos autores señalan que estos enfoques integrados han tenido su origen de una manera mayoritaria en sistemas basados en teoría de colas y aproximaciones probabilísticas, citando como ejemplos de éstos a Kozan (1997a), van Hee y Wijbrands (1998) y Kim y Kim (2002).

Sacone y Siri (2009) aplican un modelo de esta clase para resolver la operación de una terminal de contenedores. Estos autores implementan un modelo en dos capas. En un primer entorno de simulación (basado en un modelo de eventos discretos o DES) representan el comportamiento dinámico de la terminal con alto grado de detalle y lo utilizan según sus propias palabras como una herramienta de planificación operativa. En un segundo plano de optimización, se define un sistema de parámetros operativos de la terminal (por ejemplo, las ratios de utilización de medios de la misma) donde van registrando los datos sobre su rendimiento. A este segundo plano lo denominan herramienta de planificación táctica y la desarrollan bajo una arquitectura de ecuaciones en tiempo discreto. Se trata pues de un enfoque de simulación en el que el resultado final se expresa en términos de evaluar el rendimiento de la terminal (optimización) en diferentes escenarios (simulación). Utilizan para ello el software comercial ARENA®.

Sin embargo, el enfoque de estos autores, que figura muy bien explicado en su artículo, ya había sido utilizado por otros investigadores entre los más significativos cabe señalar:

- Kia *et al.* (2002) quienes simulaban dos escenarios de equipamiento de una terminal sobre los que calculaban en ambos casos algunos indicadores de rendimiento como la ocupación de los atraques, la ocupación del patio y el tiempo de operación de buques;
- Liu *et al.* (2002) que comparaban cuatro escenarios diferentes de atomización de una terminal de contenedores sobre los que desarrollaban un estudio detallado de costes y rendimientos;
- Nam *et al.* (2002) que analizan el rendimiento de diferentes patrones de operación en la asignación de atraques en las terminales de contenedores de Gaman en Busan (Corea del Sur)¹⁰⁸;
- Shabayek y Yeung (2002) aplican técnicas similares en un modelo de evaluación del rendimiento de las operaciones de la terminal de Kwai Chung (Hong Kong);

¹⁰⁷ Denominan a estos segundos “*optimization-based models*” frente a los primeros que los denominan simplemente “*operational research*”

¹⁰⁸ Busan es también conocida como Pusan y es una de las seis ciudades metropolitanas de Corea del Sur.

- Hartmann (2004) analiza en sus trabajos la terminal HHLA del puerto de Hamburgo (Alemania); y
- Yang *et al.* (2004) que realizan aplicaciones en estudios similares de evaluación de diferentes escenarios de equipamiento de una terminal con medios automáticos.

Todas estas investigaciones tienen, seguramente, su antecedente en los estudios de Ramani (1996), Gambardella *et al.* (1998), Yun y Choi (1999) y Legato y Maza (2001), que son también referenciados en la revisión bibliográfica que sirve de introducción al artículo de Sacone y Siri (2009).

Gambardella *et al.* (1998) utilizan un caso de estudio en la terminal *Contship La Spezia Container Terminal* (Italia) y se centran en resolver el problema de asignación de recursos a cada operación acoplando un modelo de optimización de dicha asignación con otro de simulación de la terminal. El primero (optimización) es un programa de integración lineal¹⁰⁹ y el último es un modelo de simulación basado en el paradigma DES. Los estudios de estos autores resultan de especial transcendencia e influencia en el resto, aunque sólo sea por su difusión y el número de citas que han tenido con posterioridad.

2.2.5 Modelos portuarios por el paradigma de programación. Paradigmas de simulación "DES", "ABS" y "SD" en ambiente portuario. Aplicación y ejemplos.

Según Caserta *et al.* (2011) incluido en Böse (2011) los modelos portuarios también han experimentado las mismas aproximaciones "DES", "ABS" y "SD" que cualquier modelización en otro sector. Estos autores citan además algunas otras clases de paradigmas o algoritmos de simulación como son los MAS (*"Multi-Agent Systems"*)¹¹⁰, redes de Petri, o sistemas integrados simulación-optimización.

En lo que se refiere a realizaciones prácticas en el ambiente portuario se pueden señalar:

- Simulación mediante técnicas de eventos discretos ("DES"). Estos sistemas son quizás los de mayor difusión científica y de más aplicación en el campo portuario en lo que se refiere a

¹⁰⁹ Usualmente denominados problemas ILP (de su acrónimo inglés *"integer linear programming"*)

¹¹⁰ Estos sistemas son tratados, por ejemplo, en Wooldridge (2002), Shoham y Leyton-Brown (2008), y Siebers y Aickelin (2008).

campos operacionales o tácticos. También son los modelos que antes se introdujeron y los que cuentan con una mayor cobertura comercial a través de herramientas específicas que facilitan su implantación a bajo coste.

Carteni y de Luca (2009a) realizan una revisión bibliográfica de la utilización de este paradigma en entornos portuarios dando unas guías prácticas para su aplicación, desplegándolas a su vez a un diseño experimental concreto en la terminal de contenedores de Salerno (Italia) en Carteni y de Luca (2009b). Esta primera revisión bibliográfica que realizarían en el año 2009 fue posteriormente ampliada por los mismos autores en Carteni y de Luca (2012) aunque, como en el primer caso, circunscrita a la investigación sobre terminales de contenedores. Una revisión anterior a éstas se encuentra en Holguin-Veras y Walton (1995).

Sin ánimos de ser exhaustivos, pues muchas son las referencias que se pueden encontrar en este apartado, se citan a continuación los principales autores que han utilizado este paradigma: Hayuth *et al.* (1994), Koh *et al.* (1994a), Holguin-Veras y Walton (1996), Ramani (1996), Gambardella *et al.* (1998), Nevins *et al.* (1998b), Mastrolilli *et al.* (1998), Yun y Choi (1999), Tahar y Hussain (2000), Duinkerken y Ottjes (2000), Gambardella *et al.* (2001), Legato y Mazza (2001), Legato y Rina (2001), Sgouridis y Angelides (2002), Shabayek y Yeung (2002), Kia *et al.* (2002), Rizzoli *et al.* (2002), Sgouridis *et al.* (2003), Dahal *et al.* (2003), Howard *et al.* (2004), Carteni *et al.* (2005), Parola y Sciomachen (2005), Bugaric¹¹¹ y Petrovic (2007), Cortés *et al.* (2007), Lee y Cho (2007), Canonaco *et al.* (2008), Petering (2009), Petering y Murty (2009), Petering *et al.* (2009), Ambrosino y Tanfani (2009), Parola y Sciomachen (2009), Rida *et al.* (2011), Rida (2014), Süze (2015), Cáceres *et al.* (2015) y Elentably (2015).

Otros autores como Zhang *et al.* (2011) utilizan una variante de los modelos DES que ya se ha enunciado en puntos anteriores como son los denominados “*discrete-time simulation models*” en un interesante estudio para analizar la coordinación entre el atraque y el tránsito en canal y para analizar dos posibles estrategias de operación como son las FIFO¹¹² y las MBFS¹¹³ concluyendo que en el experimento ensayado (centrado en el puerto de Tianjin, China) son mejores las segundas que las primeras.

¹¹¹ Ugljesa Bugaric y sus colegas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Belgrado (República de Serbia) resultan especialmente interesantes pues son de los pocos autores que abandonan el estudio específico de terminales de contenedores que ha nutrido este campo científico por sus especiales características para ampliar el campo a las terminales de graneles. Muestras de sus trabajos son, al margen del arriba citado Bugaric y Petrovic (2007), el también interesante Bugaric *et al.* (2011), su continuación en Bugaric *et al.* (2012) o el primero de la serie que se ha localizado en Bugaric y Petrovic (2002). Todas estas referencias son tratadas en el capítulo 4.

¹¹² Acrónimo de “*First In First Out*” y también conocidas como FCFS de “*First Come First Served*”.

¹¹³ Acrónimo de “*Minimum Berth-time First Served*”.

Sin necesidad de entrar aquí en más detalle, en el apartado 3.2. de esta tesis doctoral se amplían las referencias arriba indicadas y se describen algunos ejemplos prácticos de los modelos portuarios desarrollados sobre este paradigma.

- Sistemas orientados a agentes (“ABS” de *agent-based simulation*) o sistemas multi-agentes (“MAS”). Como ejemplo de utilización de sistemas ABS o MAS en puertos se podría destacar la tesis doctoral basada en la aplicación de estos sistemas a terminales de contenedores incluida en Henesey (2006b); que es la culminación de una extensa colección de artículos de este autor (en solitario o como coautor junto a otros investigadores) dedicados a la aplicación de estos sistemas en puertos y que materializa en un modelo de propósito específico para terminales de contenedores (extrapolable a cualquier terminal) que denomina bajo el nombre *SIMPORT*. No es, sin embargo, éste el único ni el primer autor que introduce este enfoque en puertos. El tema se remonta a Rebollo *et al.* (2000), investigadores de la Universidad de Valencia (España) que aplican este paradigma al estudio de la automatización de terminales de contenedores.

Como investigaciones más destacadas en el campo de simulación multiagente o MAS se podría citar: Henesey (2002), Henesey *et al.* (2002), Kaihara (2003)¹¹⁴, Henesey *et al.* (2003b), Henesey (2003), Sinha-Ray *et al.* (2003), Henesey (2004a), Botti (2004), Bielli *et al.* (2006), Henesey y Persson (2006), Henesey (2006a), Henesey *et al.* (2006b), Henesey *et al.* (2006c), Henesey *et al.* (2007) y Kefi *et al.* (2007).

Dentro de investigaciones ABS destacarían: Henesey *et al.* (2003a); Henesey *et al.* (2004); Davidsson *et al.* (2005a); Davidsson *et al.* (2005b); Henesey *et al.* (2006a); Henesey *et al.* (2006d); Bin *et al.* (2009); Silva *et al.* (2011) y Mustafee y Bischoff (2011).

De igual modo se dedica un apartado específico a esta variante de simulación en el capítulo 3.3 donde se amplían referencias y se describen algunos de estos modelos.

- Sistemas Dinámicos. En lo que se refiere a sistemas SD en puertos, son muchas las referencias bibliográficas que se pueden encontrar en la última década. En el capítulo 3.4 se aborda específicamente esta herramienta y su aplicación a entornos portuarios. Estos sistemas están especialmente prescritos cuando se trata de explotar modelos muy complejos, donde el nivel de variables y las conexiones entre ellas son muy complicadas y la posibilidad de que cambien las relaciones entre variables es muy grande, los horizontes de simulación son muy largos o

¹¹⁴ Este autor se refiere específicamente a un tema más general como es el de “cadena de suministro” y no específicamente a la especificidad portuaria, pero se cita aquí por su analogía y posterior influencia.

allí donde el nivel de abstracción necesario para obtener resultados es grande (no siempre soportado en datos cuantitativos sino cualitativos).

Según la clasificación que Oztanriseven *et al.* (2014), los modelos portuarios que se han conformado bajo SD, pueden agruparse en cuatro categorías:

- Modelos de investigación operativa en terminales (diseño y optimización de operaciones portuarias),
- Evaluación económica o ambiental de puertos o sistemas portuarios,
- Análisis de cadena de suministro, logísticos y gestión de flotas,
- Desarrollo de planes de contingencia y análisis de riesgos en puertos o aspectos macroeconómicos en relación a los puertos y sus hinterland.

Como se ha analizado en el primer capítulo de esta tesis, en los últimos años se están desarrollando con auge sistemas multiparadigma en el que en una estructura de capas parte del problema se resuelve mediante un paradigma, con cuyos resultados se alimenta una segunda capa, plano en el que se resuelven otro problema distinto.

Pese a la búsqueda de ejemplos concretos de utilización de plataformas multiparadigma como éstas en el ámbito portuario, no se ha podido evidenciar ninguna referencia concreta de valor, por lo que se entiende que éste es un campo de expansión científica futura de gran potencial. Así, mediante estos sistemas se podrían resolver de una manera integral aspectos complejos de alto nivel de abstracción (utilizando técnicas SD) con cuyos resultados se podrían alimentar módulos más operativos o tácticos (programados estos bajo paradigmas DES o los hoy aparentemente en auge ABS)¹¹⁵.

¹¹⁵ Como ejemplo de esta tendencia se podría citar a Swinerd (2014) quien proporciona unas pautas en el diseño de estos sistemas híbridos y se centra en su caso en la combinación de paradigmas ABS con SD

2.3 Modelos de propósito especial diseñados para entornos portuarios.

2.3.1 Introducción a los modelos de propósito especial portuario.

Las técnicas de simulación fueron trasladadas a entornos portuarios ya que la complejidad de los sistemas y su posibilidad de parametrización las hacían un candidato ideal para su importación.

Frankel *et al.* (1974a y 1974b) fueron los primeros investigadores que de una manera global y específica abordaron con cierta profundidad y en un texto completo las técnicas de simulación en ambientes portuarios. Posteriormente Frankel (1987) recopiló la información y el “*estado del arte*” de los modelos portuarios de propósito especial que se habían desarrollado hasta la fecha. Todos estos trabajos fueron fruto a su vez del germen que supuso el proyecto “*Port Design and Analysis Methodology*” recogido en Frankel *et al.* (1973).

La obra “*Port Planning and Development*” (Frankel, 1987) sigue siendo un texto clásico en todos los aspectos de gestión portuaria que se citará con profusión a continuación. Sin desmerecer otros, es posiblemente el texto más referenciado de la historia en este campo, si bien y como resulta evidente, es a la fecha un texto realmente desactualizado.

Desde el punto de vista práctico y como se pondrá de manifiesto con mayor profundidad más adelante, el primer modelo de propósito especial para entornos portuarios fue el que, desarrollado por Naciones Unidas, se describe en UNCTAD (1969); al que siguieron otro en 1974 desarrollado por el Banco Mundial bajo el nombre de PORTSIM y presentado en Comer y Taborga (1974) y un tercero, del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) denominado MIT *Port Simulator* (1987) cuyo autor es el propio Frankel y que se encuentra bien descrito en Frankel (1987).

Más tarde han tenido cierta difusión modelos con fines militares que trataban de optimizar las operaciones de embarque y desembarque de tropas, equipamiento y avituallamiento. Estos modelos que han visto la luz en la comunidad científica en los años 90 bajo los nombres genéricos de modelos de embarque (“POE” de “*Port of Embarkation*”) y modelos de desembarque (“POD” de “*Port of Desembarkation*”). De entre los POE se podría citar el también denominado

PORTSIM¹¹⁶ (desarrollado por el centro *Argonne National Laboratory*¹¹⁷) y que se encuentra descrito en Nevins *et al.* (1995, 1989a y 1998b) y dentro de los POD el CPORTS 1.4 (desarrollado por el centro *Virginia Modeling, Analysis and Simulation Center*¹¹⁸) descrito en Howard *et al.* (2004).

Los modelos de propósito especial enfocados a gestión portuaria que se van a presentar a continuación y que se acaban de enunciar no son los únicos ni tienen por qué ser los mejores, pero se presentan no sólo para dar una idea de las estructuras que suelen requerir estos modelos y su lógica asociada; sino también por la influencia y difusión que los mismos han tenido a lo largo del tiempo. Efectivamente, como se verá más adelante, su arquitectura y enfoque son los que han inspirado los modelos que con posterioridad se desarrollarían, incluidos las adaptaciones de los modelos de propósito general al caso portuario.

Comenzando por los orígenes y en orden cronológico el primer modelo fue el *UNCTAD Port Operations Model* (1969) (que en esta tesis y de manera simplificada se referenciará como PORTMODEL). Su objetivo era analizar la eficiencia de diferentes estrategias alternativas de expansión portuaria u optimización de operaciones, siendo capaz de investigar con suficiente grado de detalle la operativa completa de un puerto. Se trataba de un modelo bastante intuitivo y con una capacidad relevante para la época, pero, presentaba, sin embargo, ciertas limitaciones ya que no era capaz de reproducir modelos demasiado complejos (como por ejemplo una terminal de contenedores) y que, como pasó posteriormente con el resto de modelos de propósito especial, quedó rápidamente sin evolución y superado por otros modelos de ámbito comercial. Se describe con más detalle este modelo en el apartado 2.3.2.

Más tarde, en el año 1974, el Banco Mundial desarrolló PORTSIM (Comer y Taborga, 1974). Este modelo tal y como los propios autores reconocen al describirlo, debía ser considerado más como una herramienta de valoración económica que como un propio modelo de simulación de la operación portuaria (en contraste con el modelo desarrollado por la UNCTAD cuyo enfoque prioritario era representar de una manera global la operación de un puerto). Este modelo es abordado en el apartado 2.3.3.

En 1987 y dentro del MIT se construye el MIT Port Simulation (Frankel, 1987). Este modelo retoma la senda del desarrollado por la UNCTAD ya que con el mismo se pueden analizar puertos

¹¹⁶ No confundir con el modelo que bajo el mismo nombre pero usos civiles desarrolló el Banco Mundial y que también ha sido presentado en esta tesis o con aquel otro denominado PortSIM desarrollado en Koch (2007) en el marco de un estudio sobre terminales de contenedores de los Estados Unidos y financiado por el Oak Ridge National Laboratory (Knoxville, Tennessee, USA).

¹¹⁷ El *Argonne National Laboratory* está situado en Illinois (Estados Unidos).

¹¹⁸ El *Virginia Modeling, Analysis and Simulation Center* está situado en Virginia (Estados Unidos).

multipropósito (diferentes tipos de cargas y barcos) y el conjunto de los servicios prestados en el mismo (remolque, practica, etc.) configurándose como un verdadero modelo integrado. Este modelo es descrito con más detalle en el apartado 2.3.4.

Como se ha anticipado, bajo el paraguas de la industria militar, se desarrollaron también una serie de modelos portuarios, con el objetivo de diseñar y optimizar las operaciones de embarque y desembarque. Así, se encuentran modelos que bajo la denominación genérica común de POD (“*Port of Disembarkation*”) o POE (“*Port of Embarkation*”) han tenido como ejemplos más difundidos en la comunidad científica el CPORTS y el también denominado PORTSIM (en este caso de uso militar y que nada tiene que ver con el desarrollado por el MIT). Estos modelos tienen cierto interés metodológico que se describirán en el apartado 2.3.5.

Sin embargo, como se ha señalado estos modelos quedaron rápidamente obsoletos en relación a la potencia que otorgaba la utilización de paquetes comerciales específicos de simulación (lenguajes de simulación o simuladores) que sus desarrolladores se encargaban de hacer evolucionar continuamente mejorando sus funcionalidades, usabilidad, velocidad, etc. Así, en los primeros años del siglo XXI no se encuentran en la literatura científica ejemplos prácticos de su aplicación ni se ha podido detectar una evolución de los mismos. Se dedicará una reseña específica para ver cómo este software altamente especializado y comercial se ha introducido en el campo de la ingeniería portuaria (apartado 2.3.6.).

Antes de empezar con la descripción de detalle de cada uno de los modelos, se puede indicar como comentario general que, aun cuando estos modelos están especialmente diseñados para su aplicación en ambientes portuarios de una manera generalista, no es menos cierto que los mismos deben ser ajustados en cada caso a las condiciones locales del sistema (siempre cambiantes) y en función del fenómeno que se esté valorando (también potencialmente distinto).

Efectivamente, con carácter general, cada modelo es único e inextrapolable a otro sistema. Y esto es así por mucho que ambos presenten similitudes. Por ello, aun cuando se trabaje sobre las bases de un modelo ya existente es siempre necesario realizar ajustes y calibraciones.

Es por ello que, la experiencia y capacidad previa de análisis de la persona que vaya a realizar la simulación son factores determinantes para extraer de los modelos los resultados que se desean obtener, debiendo éste contar con cimientos sólidos en técnicas de gestión portuaria.

Frankel (1987) señala la potencia de estos métodos para resolver sistemas portuarios complejos o sólo parcialmente conocidos, pero también destaca que deben tomarse ciertas precauciones a la hora de representar problemas portuarios bajo modelización siendo necesario una reflexión previa

y profunda sobre el modelo que se quiera construir contestando a una serie de preguntas previas. A saber¹¹⁹:

- ¿Cuál es la mejor herramienta de simulación?, ¿Es mejor utilizar un lenguaje de programación, un lenguaje de simulación o un simulador?;
- ¿Es necesario la utilización de un modelo continuo o discreto?, ¿Uno dinámico o uno estático?;
- ¿Cuál es el paso más apropiado para el modelo (“*time step*”)?;
- ¿Se requiere una simulación iterativa con retroalimentación o “*feedback*”¹²⁰?;
- ¿Cuáles son las restricciones intrínsecas al paquete de simulación?;
- ¿Cuál es la estructura que debe darse al modelo?;
- ¿Qué base de datos alimenta el modelo? ¿Cómo de disponibles y cuan precisos son éstos?;
- ¿Qué grado de abstracción requiere el modelo?;
- ¿Qué condiciones experimentales se modelan para obtener una correcta interpretación de los resultados?;
- ¿Existen modelos previos parecidos contrastados con datos reales?, ¿han sido estos modelos eficaces cuando tras el transcurso del tiempo han sido capaces de ser validados con la realidad observada?; y
- ¿Cuál es el coste de utilización de dichos modelos y su comparación en relación a otros métodos alternativos? ¿el extracoste justifica los mejores de resultados del análisis que a realizar?.

¹¹⁹ Parte de estas preguntas son enunciadas por Frankel (1987) y otras se añaden dentro de esta tesis doctoral.

¹²⁰ Este autor indica expresamente que esto es usualmente necesario en planificación portuaria.

2.3.2 Los orígenes del modelo UNCTAD (PORTMODEL, 1969).

El primer modelo de propósito especial que se ha referenciado en la literatura científica es el desarrollado por la UNCTAD y conocido como *Port Operations Model* (de manera simplificada para esta tesis se denominará PORTMODEL).

Probablemente, los orígenes del proyecto datan de finales de los años 60 y se pueden encontrar las primeras referencias al mismo en el monográfico de la UNCTAD (1969), bajo el título “*Desarrollo de puertos: Mejora de las operaciones e instalaciones portuarias*”¹²¹.

Frankel (1987)¹²² lo describió como un modelo global diseñado para permitir la evaluación de operaciones en un puerto y resolver los problemas y cuellos de botella a los que tiene que hacer frente, incluyendo otras capacidades como la evaluación de los efectos de expansión del mismo.

Es un modelo que usa como *inputs* de entrada las estadísticas y estudios previos de operación de dicho puerto. El puerto se modeliza como un sistema conjunto que, a su vez, se divide en una serie de subsistemas: áreas de fondeo, atraques, muelles, áreas de manipulación de mercancías, zonas de almacenamiento, etc.

El modelo resuelve la operación del puerto en determinadas condiciones operativas, detectando los cuellos de botella, permitiendo su resolución mediante medidas de ampliación de capacidad o rendimiento que incrementen la capacidad de ese factor limitativo y, con ello, el del conjunto portuario.

Son precisamente estas medidas de ampliación las que introduce la persona que realiza la simulación, comparando los resultados que se obtienen con la implementación de estas medidas con las que se obtienen en el estado inicial o con otras medidas de incremento de capacidad alternativas. Las comparaciones se establecen a través de indicadores de rendimiento.

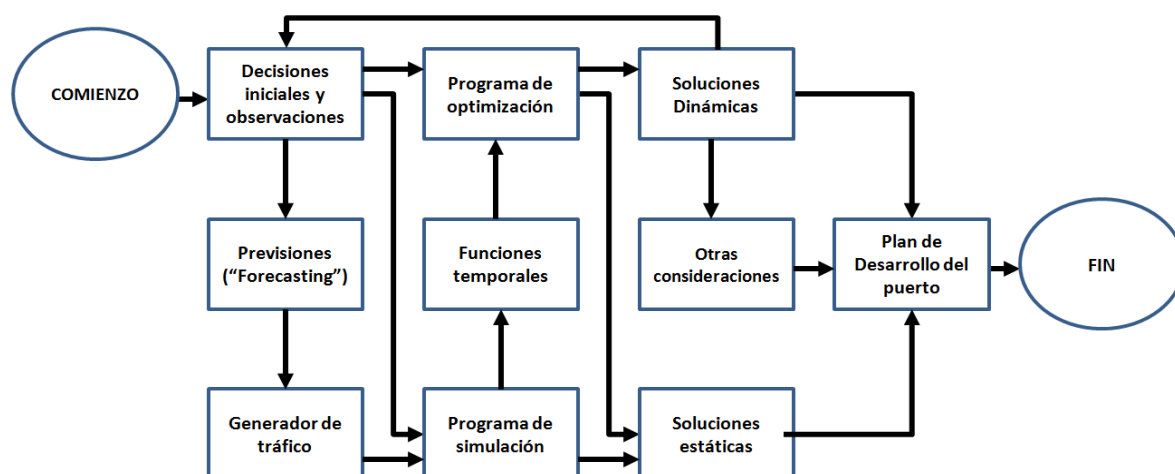
La solución óptima en cada caso (escenario de simulación) se encuentra utilizando funciones objetivas (criterios) que permiten evaluar económicamente las diferentes medidas alternativas que se adopten para satisfacer las futuras necesidades portuarias.

¹²¹ Monografía descatalogada que, por desgracia, no ha podido ser localizada. Por lo tanto, la descripción que se incluye en la presente tesis doctoral se basa en el análisis, referencias y conclusiones de terceros autores.

¹²² Referencia a Frankel (1987), páginas 390 a 395.

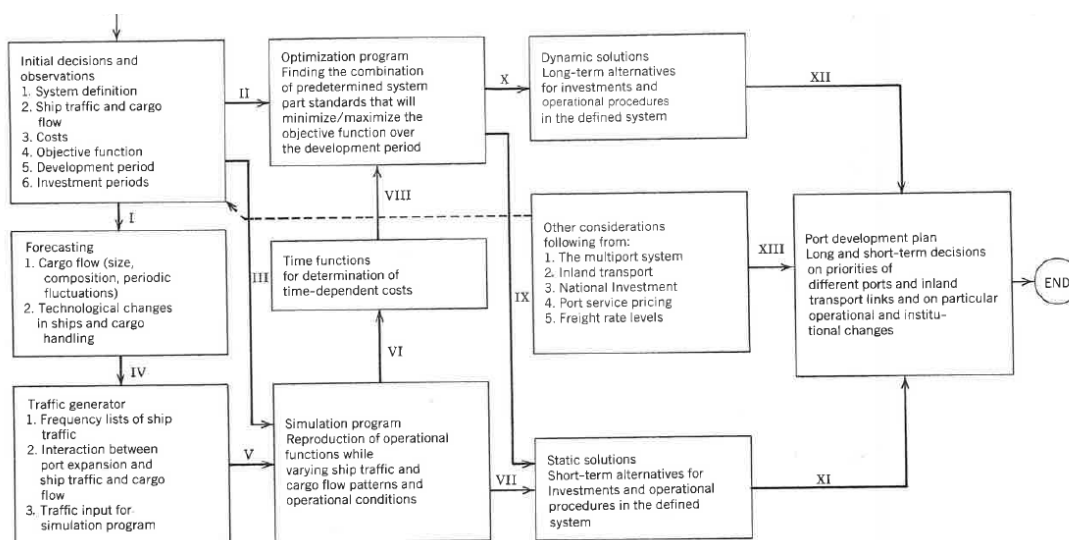
El proceso secuencial que permite modelizar la lógica de decisión para el desarrollo de un puerto, se muestra a continuación conforme lo presentó Frankel (1987) (ilustración 10), y como se implementa en PORTMODEL (ilustración 11).

Ilustración 10. Proceso secuencial resumido en el desarrollo portuario.



Fuente: Frankel (1987), elaboración propia.

Ilustración 11. Secuencia de decisión detallada en el modelo PORTMODEL.



Fuente: Frankel (1987).

PORTMODEL contiene una serie de programas (subrutinas o librerías) que se pueden definir como “satélites” agrupados en tres bloques: recopilación de datos (“*data accumulation*”),

generador de tráfico (“*traffic generator*”) y módulo de previsiones (“*forecasting*”) que sirven de fuente para el propio módulo de programación (“*programming*” o “*simulation*”). Dicho esquema modular (con los datos que incorporan cada uno de los módulos) se presentan en la tabla que se describe sucintamente a continuación.

- El primer paso, es el de recopilación de datos (“*data accumulation*”). En este bloque se registran los *inputs* que sirven de inicio al escenario de simulación. Entre estos datos se encontrarían: el tamaño de los buques, la clase de buques que recalcan en el puerto, los tipos principales de tráfico categorizados en diferentes grupos, el volumen total de tráfico (registrados separadamente los de importación y exportación) y el porcentaje medio de carga en cada escala (también separados en importación y exportación).
- En el segundo, se trata del módulo de previsiones (“*forecasting*”) que se asocia con el de generación de tráfico (“*traffic generation*”), se generan las salidas del modelo (“*outputs*”) y en ellos se combinan una serie de datos futuros que también introduce el modelador tales como proyecciones futuras en cuanto a tamaño y tipo de buques, volúmenes de mercancía, datos varios con las características y descripción del puerto, etc.
- El tercero, es el módulo de generación de tráfico (“*traffic generation*”). En el mismo se genera la secuencia de llegada de los buques en función de los datos de entrada del modelo (“*inputs*”) y las previsiones futuras que se registran en el módulo de previsión (“*forecasting*”).
- El cuarto, es el módulo de simulación (“*simulation*”) propiamente dicho, donde se reproducen las operaciones en función de las características del puerto y datos de entrada al modelo o generados en los módulos de *forecasting* y generación de tráfico; obteniendo resultados en todos los puntos del puerto según van variando los tráfico (volumen y flujos). Este módulo es capaz de procesar un amplio abanico de datos de entrada proporcionando resultados sobre los rendimientos en las operaciones de carga y descarga, volúmenes de carga en cada buque, cuellos de botella en las distintas “secciones” del puerto, datos sobre importaciones y exportaciones, datos físicos del puerto, datos sobre servicios de practica y remolque, operaciones de transporte terrestre (entrada y salida de mercancía al *inland*), capacidad almacenaje y operaciones en parques y depósitos, rendimientos de equipamiento de carga y descarga, capacidad de los muelles, sistemas de manipulación de mercancías, tiempo en las distintas operaciones y un largo etcétera según el puerto.

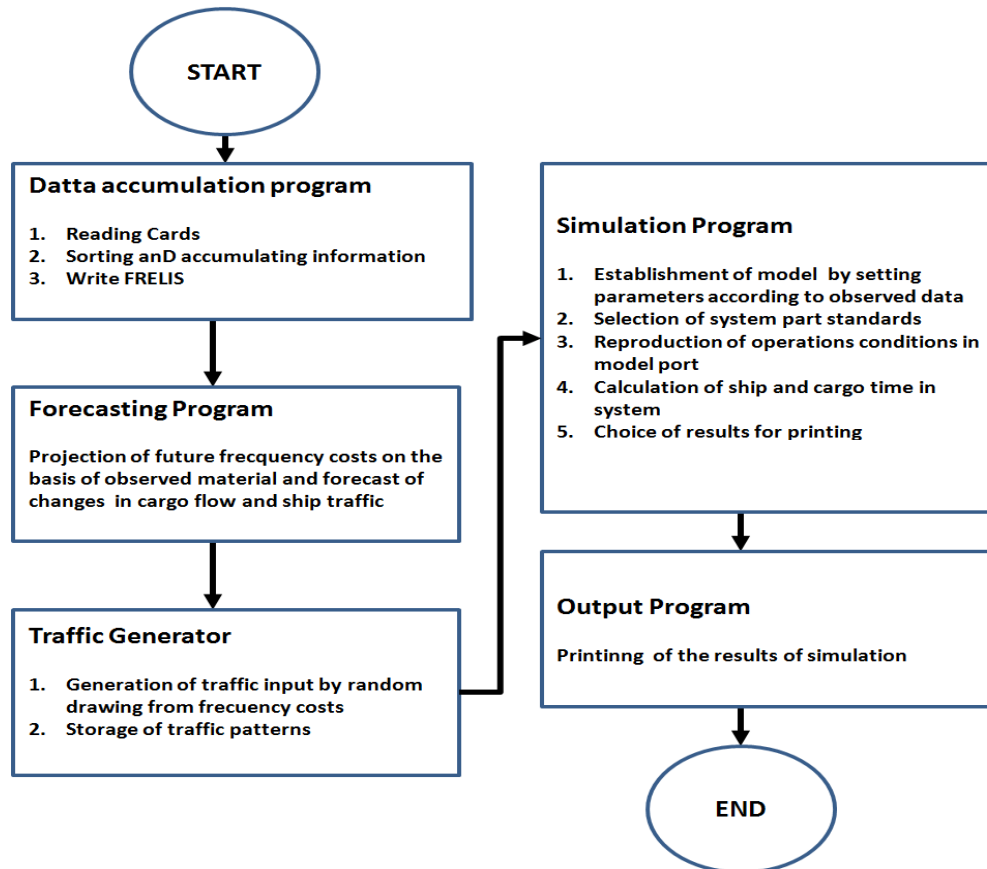
Tabla 6. Esquema modular de PORTMODEL (UNCTAD, 1969).

Módulo de recopilación de datos (“inputs”)	Módulo de previsiones (“Forecasting”) y Módulo generador de tráfico (“traffic generator”)	Módulo de simulación (“simulation”)
<ul style="list-style-type: none"> ○ Tamaño de los buques. ○ Clases de barcos. ○ Tipos principales de tráfico. ○ Volumen total de tráfico de importación. ○ Fracción media de carga en cada buque de importación. ○ Volumen total de tráfico de exportación. ○ Fracción media de carga en cada buque de exportación. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tiempo entre sucesivas llegadas de buques. ○ Reglas de prioridad por tipo de tráfico y/o buque. ○ Porcentaje de carga general (cargada o descargada) y número de escalas. ○ Número combinado de operaciones de carga y descarga para cada barco. ○ Número de escalas de barcos que no son carga general. ○ Calado y eslora de los buques. ○ Número de prácticos y remolcadores. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Operaciones de carga y descarga. ○ Volumen de carga en cada buque. ○ Cuellos de botella para pasar de una sección del puerto a otro. ○ Importaciones y Exportaciones. ○ Datos del puerto. ○ Datos de prácticos y remolcadores. ○ Transporte terrestre. ○ Almacenaje y operaciones en parques y depósitos. ○ Equipamiento de carga y descarga. ○ Capacidad de los muelles. ○ Sistemas de manipulación de mercancías. ○ Tiempo en las operaciones.

Fuente: Elaboración propia basado en Frankel (1987).

En la ilustración 12 se representa, tal y como lo ha hecho Frankel (1987), la secuencia seguida entre los diferentes módulos que conforman PORTMODEL, esquema que ayuda a comprender la lógica de eventos del simulador.

Ilustración 12. Secuencia de ejecución de PORTMODEL (UNCTAD, 1969).



Fuente: Frankel (1987), elaboración propia.

Una de las potencialidades de PORTMODEL es que puede analizar los costes de la operación. Los costes en el modelo se evalúan en función del tiempo de las operaciones (los denominan “*time-dependent costs*”) entre los que se incluyen: tiempos de operación, de fondeo, de utilización de equipamiento, de inmovilización de mercancía, etc.

Si existen datos del “coste real” de las operaciones (evaluado a través de costes unitarios) se utilizan estos, pero, cuando no se dispone de los mismos (o se prevé un cambio futuro) se utilizarían datos estimados.

Siendo así, el módulo de optimización encuentra la combinación de datos de un subsistema predeterminado que proporciona los mejores resultados (aquel que optimiza una función objetivo definida por el usuario).

Los subsistemas son una combinación de diferentes elementos, infraestructuras y recursos-equipamiento, que definen un escenario de simulación concreto, pudiendo contemplarse aspectos tan variados como: canal de navegación, diques, muelles con sus correspondientes atraques (uno o varios), práctico y remolcador, personal portuario, grúas de muelle, equipamiento de manipulación de mercancía, rampas y áreas de almacenamiento y operaciones.

Como *inputs* para el modelo de simulación se pueden incluir los costes de inversión, mantenimiento y operación, políticas portuarias (por ejemplo, criterios de prioridad en la asignación de atraque), costes de remplazo y costes diarios de diferentes tipos de buques.

El modelo está programado para la racionalización de las operaciones portuarias de una manera estática (proporciona resultados para cada configuración probada) bajo un algoritmo que puede dar resultados expresados tanto bajo el criterio de mínimo coste (aunque no sea el de mayor capacidad) o de máximo de capacidad (aunque no sea el de menor coste).

En este modelo sólo se puede reproducir un único puerto, por lo que no es posible establecer políticas de optimización logística o de cadena de suministro inter-puertos.

2.3.3 Los orígenes del modelo del Banco Mundial (PORTSIM, 1974).

Continuando con la senda que habían marcado los trabajos de la UNCTAD, el siguiente trabajo de importancia en este campo es el desarrollado por el Banco Mundial, cuando en 1974 presenta el modelo PORTSIM.

PORTSIM fue supervisado por Pedro N. Tabora miembro del Departamento de Transporte y Proyectos Urbanos de dicha institución publicándose el primer manual de usuario en Corme y Tabora (1974).

El modelo PORTSIM se define por sus propios autores como un modelo de valoración de inversiones portuarias más que como una herramienta de optimización de las operaciones portuarias (enfoque con el que había nacido PORTMODEL).

Siendo esto cierto, en este modelo, para un nivel de tráfico dado, se pueden determinar las implicaciones que una política de asignación de atraques tiene en la configuración del puerto; visualizando en ciertos intervalos de tiempo tanto datos de operación (tiempos de espera, ratios de ocupación, probabilidad de demora, tiempo y número total de barcos en puerto y en cola) como datos económicos relacionados con dichas operaciones.

PORTSIM permite a un usuario con un mínimo esfuerzo probar diferentes configuraciones obteniendo resultados en términos de coste (como se ha indicado no está pensado para hacer una optimización de detalle de las operaciones propiamente dichas). Por lo tanto, para sacar provecho al modelo deben compararse configuraciones “alternativas” teniendo siempre presente que las condiciones de “eficiencia” de las alternativas probadas son equivalentes (hipótesis que debe estar implícita en el ejercicio de simulación).

Desde el punto de vista técnico, PORTSIM es un modelo multi-ataque que descansa en procedimientos analíticos multi-colas y en el que se generan y evalúan diferentes leyes de llegada de buques y leyes de despacho de barcos en atraque (tiempos de servicio).

Para obtener este objetivo el usuario debe especificar los *inputs* de entrada:

- Número de barcos, patrón de llegada de los mismos (número de escalas), descripción de los mismos (calado, eslora, etc.) y patrón de tiempos de operación de los mismos (tiempos en atraque);
- Número de atraques y descripción de los mismos (longitud, calado, equipamiento);
- Reglas de asignación de atraques (donde atraca cada barco);
- Preferencias de atraque (si existiese colisión en la llegada de dos barcos, qué atraque y qué orden se asignaría a cada barco), y;
- Costes unitarios de barcos, muelles y equipamiento.

Como resultados de la simulación, PORTSIM es capaz de proporcionar:

- Resumen de operaciones en relación a variables asociadas al tiempo (tiempos medios de servicio y operación y ratios de ocupación);
- Resumen de resultados en relación al coste de las operaciones, y;
- Otros resultados e indicadores de rendimiento (probabilidades de retrasos, máximas longitudes de cola, etc.).

En el modelo PORTSIM, el usuario es libre de elegir las funciones de distribución que quiere emplear tanto para el intervalo entre llegadas de los barcos como para el tiempo de servicio de los buques en operación. En este caso, el simulador permite escoger entre la función Erlang de orden

$K(E_k)^{123}$ que mejor ajuste al histórico de datos de nuestra terminal (o aquel que el simulador entienda que más se ajusta si carece de dichos datos).

En el modelo, una subrutina va calculando la secuencia de llegada de buques en función de los datos de partida que se han señalado con anterioridad. Cada barco que llega se incorpora a una cola individual en espera (si no existe atraque disponible a sus características o dentro de las reglas de asignación que se le han determinado) o procede a atracar en el muelle que se le haya asignado (si existe atraque libre).

Ante el evento de liberación de un atraque, se procede a atracar un nuevo barco que esté en cola bajo los criterios de tiempo de llegada y prioridades de atraque definidas por el usuario. PORTSIM tiene establecido unas reglas de prioridad “predefinidas” que pueden ayudar al usuario a conceptualizar el modelo, siguiendo, en general, asignación de atraques mediante criterio FIFO en la que el atraque se asigna al barco que lleva más tiempo en la cola.

El modelo trabaja mediante eventos, de tal modo que no se llama a la rutina de asignación de atraques hasta que se haya producido una nueva llegada de un barco (comprobando si existen atraques vacíos) o a la salida de un barco atracado (comprobación si existe un buque esperando que sea compatible con el atraque liberado), haciendo chequeos periódicos de que la intensidad de tráfico es tal (en relación al número de atraques) que no se llegue a un estado de inestabilidad en el modelo (en términos generales, el modelo se detiene cuando la longitud de barcos en cola alcanza las cincuenta unidades, momento en el que se entiende que se ha llegado al tráfico de saturación tal y como se describe en el anejo 1).

En cuanto a la operación de barcos atracados y como pasaba con las reglas de prioridad, PORTSIM ofrece diferentes alternativas al usuario para simplificar la entrada de datos y conceptualización del modelo.

En uno de los métodos se considera el equipamiento usado para atender el barco, mientras que el otro directamente utiliza como datos las distribuciones de tiempo de servicio que previamente el usuario ha introducido.

Para el primer caso (tiempos de servicio dependiendo de la asignación de medios), el modelo divide el barco en diferentes secciones (bodegas) en función de su eslora y le asigna los medios que le hagan falta (si los tiene disponibles) o, si no tuviera suficientes, el número de medios que tenga disponibles (“ociosos”).

¹²³ Véase el anejo 1 donde se describen las funciones de distribución Erlang cuando se analizan los procedimientos analíticos basados en la teoría de colas.

Para facilitar el trabajo del usuario en este aspecto, PORTSIM también ofrece una biblioteca de ratios medios de carga / descarga que el usuario puede escoger para cada tipo de tráfico.

Para que los datos sean representativos, el modelo no registra estadística de resultados durante un periodo inicial de operación en el que como es sabido por teoría de colas el sistema se encuentra en un estado inicial y no ha llegado a una situación de estabilidad en la formación de posibles colas (condición que era necesaria para su aplicación a entornos portuarios)¹²⁴.

Este tiempo (denominado “*run-in time*”) es customizable por el usuario. A partir de aquí, el usuario puede elegir el tiempo de operación del modelo (número de meses o años de operación) que más le convenga para tener unos resultados fiables y bajo la consideración de que a mayor tiempo de explotación del modelo, mayor tiempo computacional y mayor coste del mismo.

Una de las características que hacen de PORTSIM una buena herramienta de valoración es que permite repetir un número elevado de veces la simulación para una misma configuración, de tal modo que el estado final de una de las simulaciones se tome como estado inicial de la siguiente simulación (eliminando de esta manera el efecto del *run-in time*) y permitiendo con ello no solamente dar estadísticas de resultados, sino intervalos de confianza en los mismos.

Así mismo, si se cuenta con buenos datos históricos del puerto, el modelo puede calibrarse de una manera sencilla de tal modo que se selecciona la funciones Erlang de orden “*K*” (tanto en tiempo entre llegadas de buque como en tiempos de servicio de los mismos) que proporciona unos resultados del modelo que más se aproximen a los datos reales observados incluidas llegadas puramente aleatorias propia de procesos markovianos y expresadas mediante funciones exponenciales (función Erlang de fase 1 y denotada clásicamente con *M* en vez de *E*₁) o procesos deterministas en el que los tiempos de llegadas o de servicio responden a leyes constantes (función Erlang de fase “ ∞ ” que se denota como *D* en vez de *E* _{∞})¹²⁵.

PORTSIM fue usado por el propio Banco Mundial tanto en experiencias prácticas de planificación previa y proyectos de expansión en diferentes puertos (Brasil, Chipre, Gambia, Papúa Nueva Guinea, Sudán, ...); como en evaluaciones *ex - post* (Pakistán) y se trataba de un software de libre acceso para los países socios del Banco.

¹²⁴ Véase el anejo 1 donde se describen las condiciones de aplicación y simplificaciones necesarias para aplicar los procedimientos analíticos basados en la teoría de colas a instalaciones portuarias.

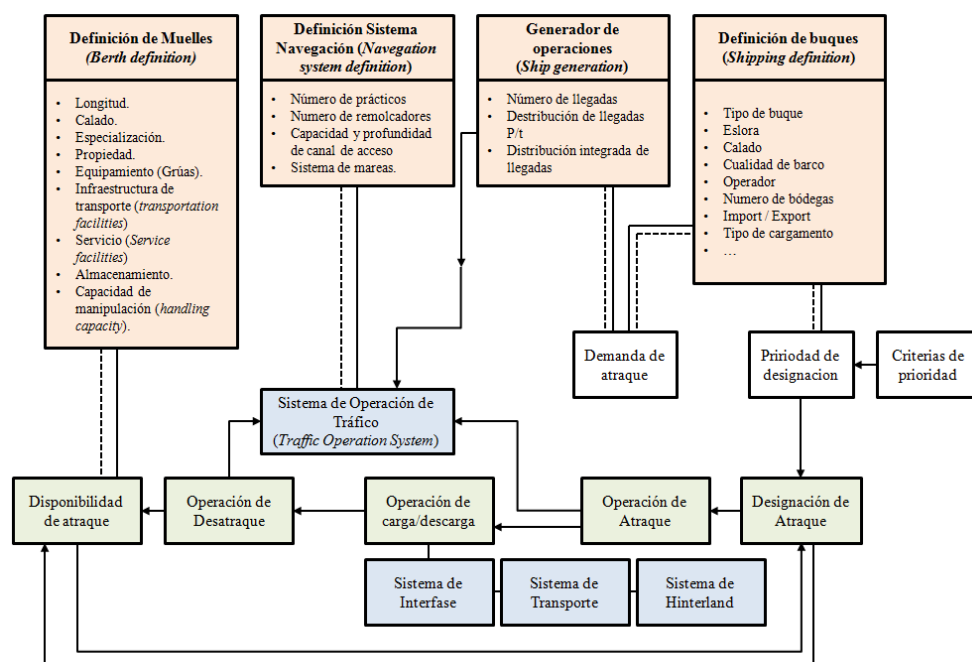
¹²⁵ Véase el anejo 1 donde se describen las funciones de distribución Erlang cuando se describen los procedimientos analíticos basados en la teoría de colas.

2.3.4 Los orígenes del modelo general de simulación de control de operaciones portuarias (MIT Port Simulator, Frankel 1987).

En 1987 Ernst G. Frankel, del *Massachusetts Institute of Technology* (“MIT”), desarrolla el modelo general de simulación de control de operaciones portuarias (MIT Port Simulator, Frankel 1987), describiéndole con cierto grado de detalle en un capítulo de su libro “*Port Planning and Development*” (1987) (páginas 371 a 397).

El modelo del MIT se desarrolla conforme la lógica de proceso que se muestra en la ilustración 13 basada en cuatro módulos de datos (muelle, de navegación, de generación de llegadas y de buques) y una secuencia fundamental que transcurre desde la asignación de atraque, pasando por la operación de atraque, operación de carga/descarga, desatraque hasta que nuevamente queda el atraque libre.

Ilustración 13. Lógica del modelo de simulación portuaria del MIT.



Fuente: Frankel (1987) y elaboración propia.

Este modelo permite modelizar un puerto con diferentes atraques especializados (graneles líquidos o sólidos, contenedores, pasajeros, mercancía convencional general, etc.) y con diferentes composiciones de flota llegando al mismo (petroleros, portacontenedores, etc.) por lo que puede ser utilizado como un simulador multipropósito.

Para la asignación de atraque se tienen en cuenta los datos de buques y de generación de llegadas junto con unos criterios de prioridad de asignación; de tal modo que con los datos de llegada y de los buques se genera un modelo de demanda de atraque.

El modelo de generación de llegadas de buque va creando una secuencia de llegadas y generando una tabla de demanda de atraques en el que se registra el número de buque y el momento de llegada de cada barco y una serie de características del mismo (tabla 7).

Tabla 7. Generación de demanda de atraque en el modelo MIT.

	T	TB	E	C	CB	OP	B	Q	QO	QT	TQ	SS	PR
1													
2													
3													
4													
...													
N													

Fuente: Frankel (1987), elaboración propia.

T: Tiempo de llegada.
 TB: Tipo de Barco.
 E: Eslora buque.
 C: Calado del buque.
 CB: Calidad de barco.
 OP: Operador.
 B: Número de bodegas.
 Q: Cantidad Carga a bordo (Tn,...).
 QO: Tipo carga en relación al operador/ propietario del atraque.
 QT: Tipo carga en relación al medio de transporte.
 TQ: Tipo de carga.
 SS: Subsistema de asignación de parámetros.
 PR: Parámetro de asignación de prioridades.

A su vez, con los módulos de datos de navegación (prácticos, remolcadores,...) y de generación de llegadas, se alimenta el sistema de operación de tráfico (al que vierten datos tanto las operaciones de atraque como desatraque para liberar o asignar recursos).

Mediante la programación de reglas de prioridad en el atraque definidas por el usuario, se van asignando los atraques o formando las colas en el caso de que los atraques estén ocupados.

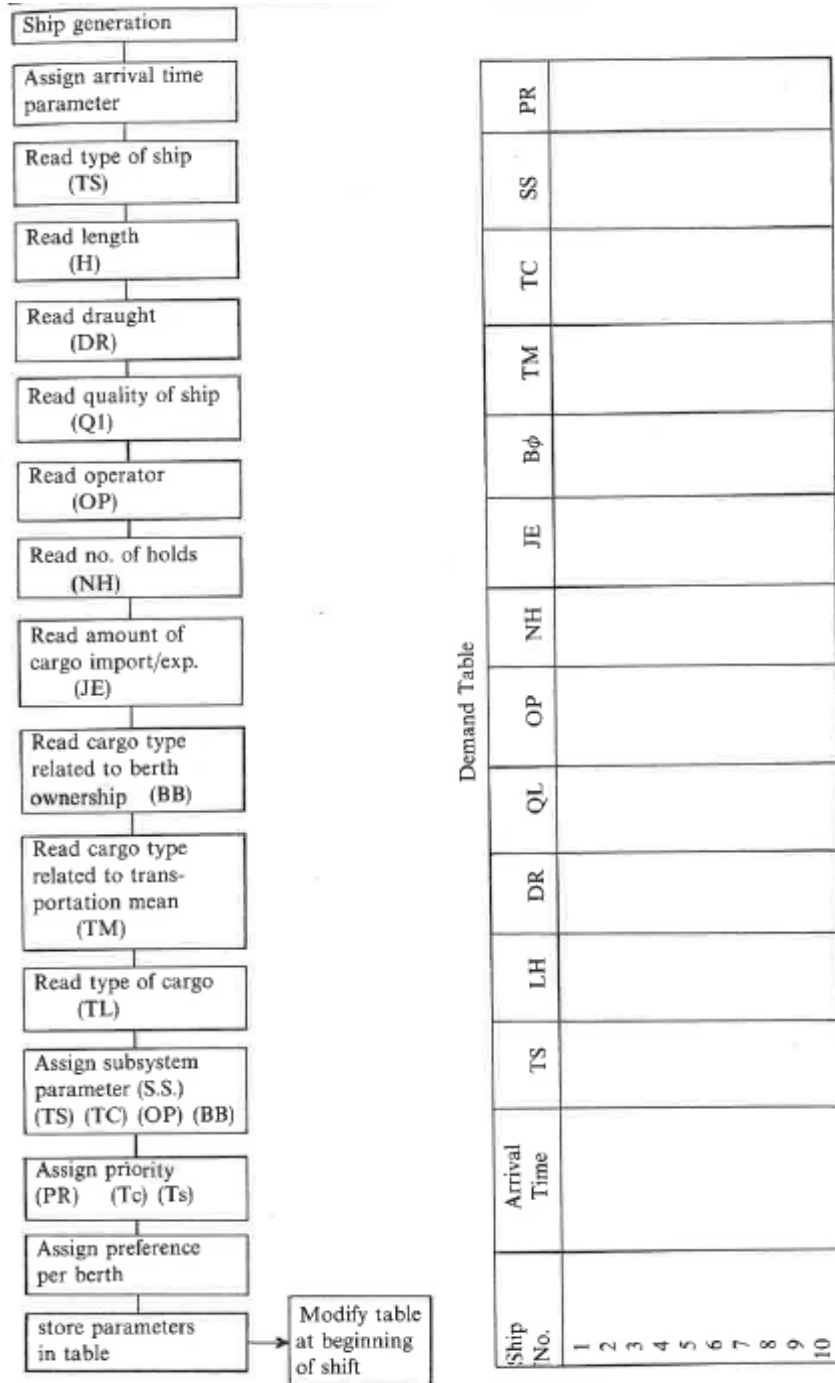
A su vez una interfase conecta el puerto con su *hinterland* y sistema de transporte y accesos.

Es en esta interfase donde se genera la dinámica de mercancía import / export del puerto (volumenes y tiempos de llegada) y es la que junto con la ocupación de los muelles, se opera a través de un algoritmo de carga/descarga que tiene en cuenta los tiempos de servicio de los buques y define la secuencia en la cual va acabando la operación en los buques y se procede a liberar el muelle para otra operación.

En las siguientes ilustraciones, extraídas directamente de Frankel (1987) y referidas todas al simulador PORT SIMULATOR, se puede encontrar:

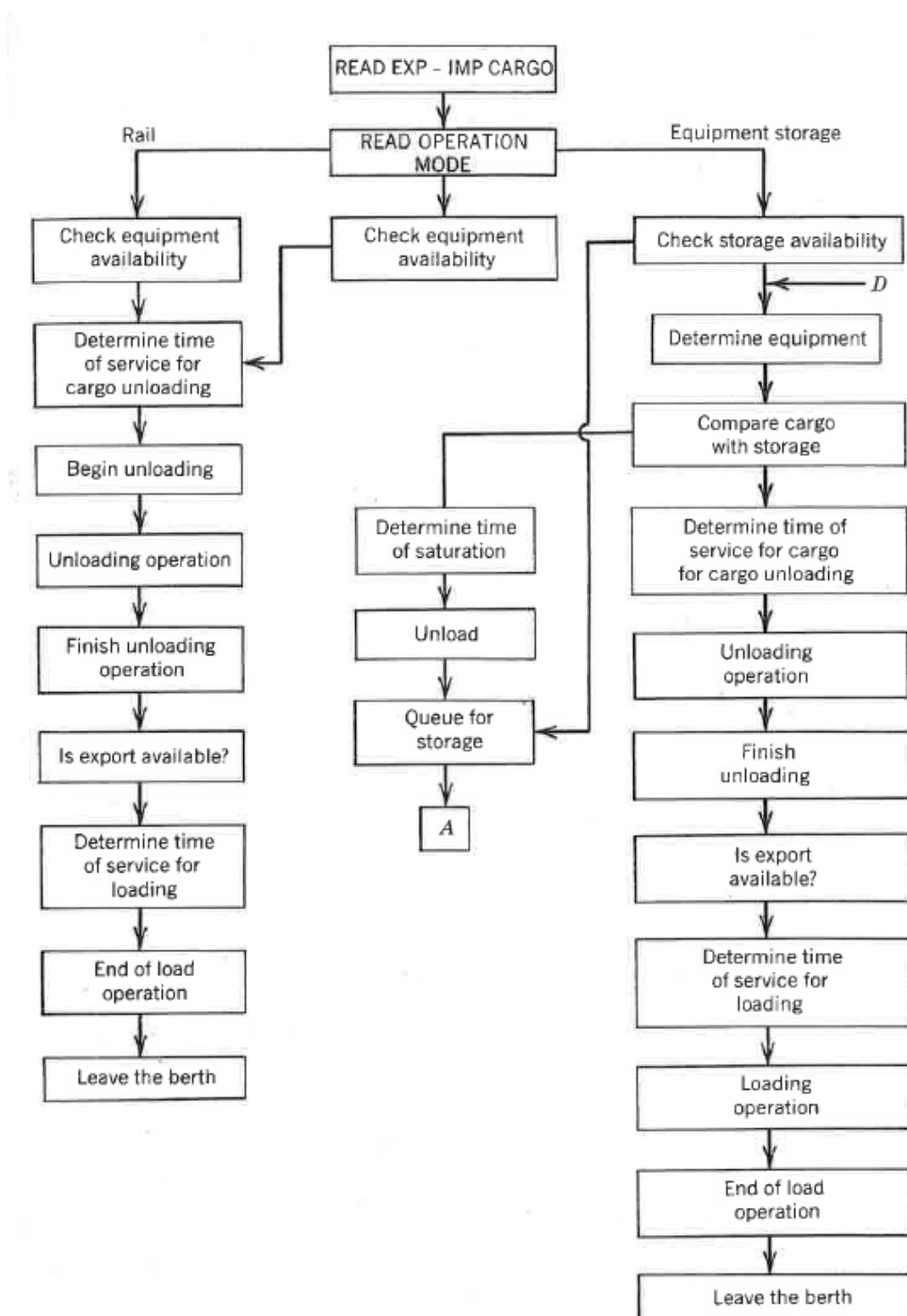
- Ilustración 14. Definición de buques y construcción de la tabla de demanda de atraque.
- Ilustración 15. Lógica del programa de operación.
- Ilustración 16. Diagrama de flujo de asignación de atraque.
- Ilustración 17. Rutina de operación.
- Ilustración 18. Rutina de asignación de atraque.
- Ilustración 19. Núcleo de decisión en el módulo de simulación.

Ilustración 14. Definición de buques y construcción de la tabla de demanda de atraque.



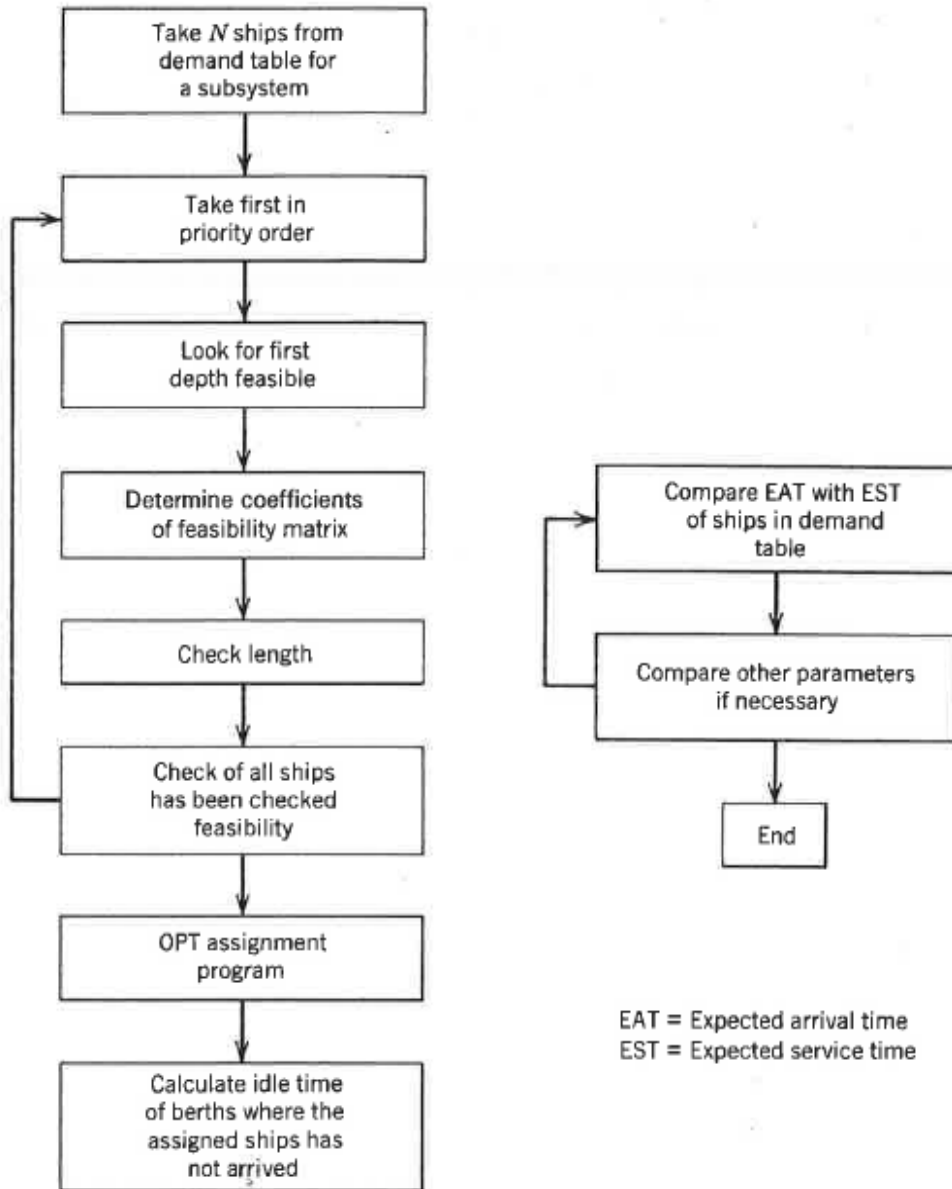
Fuente: Modelo PORT SIMULATOR del MIT, Frankel (1987).

Ilustración 15. Lógica del programa de operación.



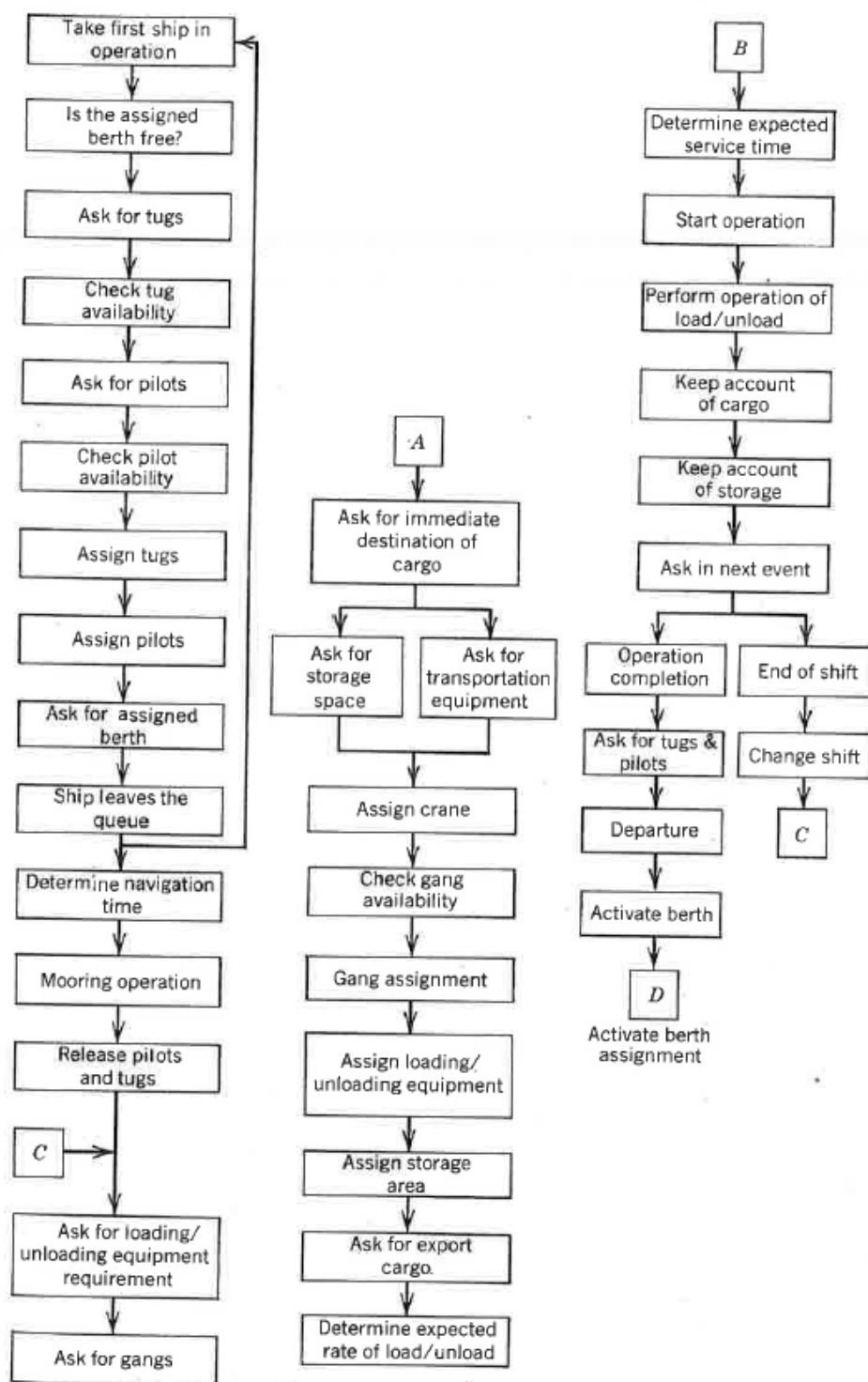
Fuente: Modelo PORT SIMULATOR del MIT, Frankel (1987).

Ilustración 16. Diagrama de flujo de asignación de atraque.



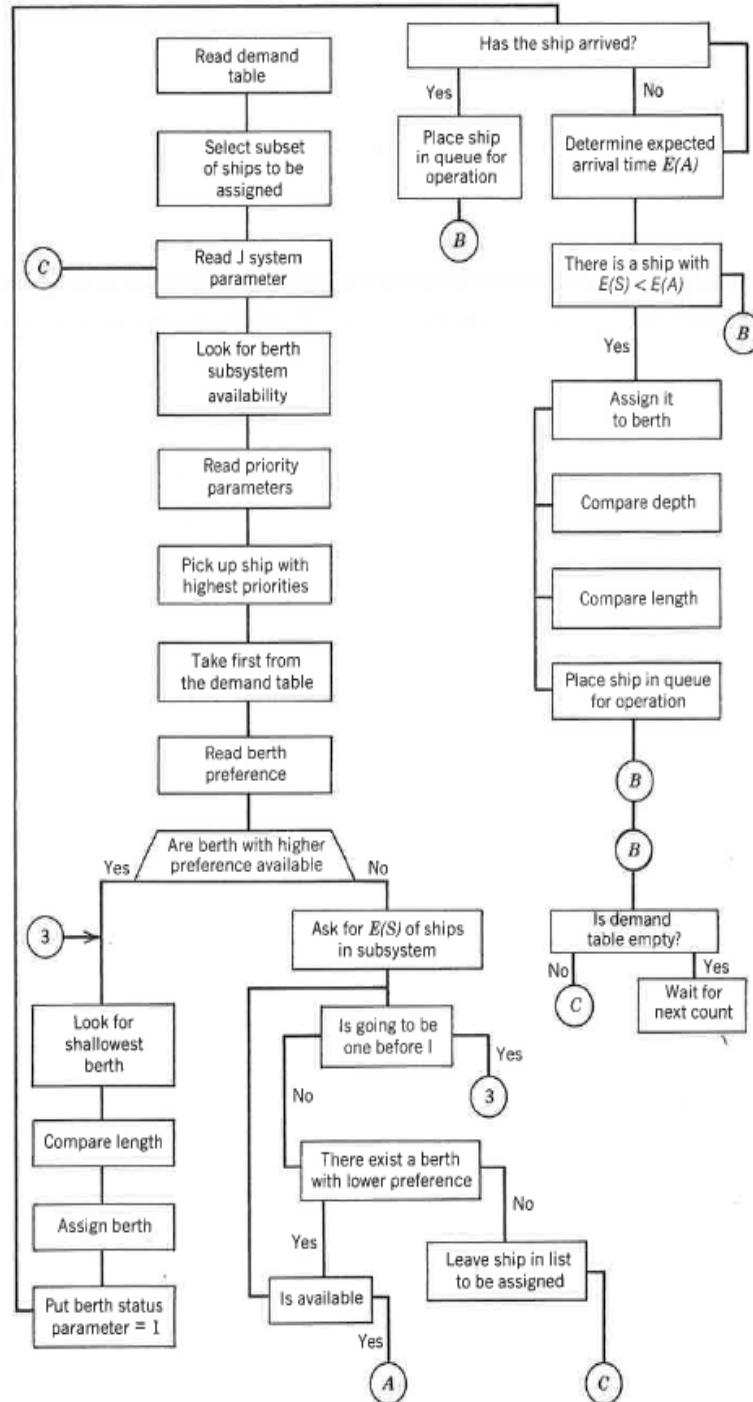
Fuente: Modelo PORT SIMULATOR del MIT, Frankel (1987).

Ilustración 17. Rutina de operación.



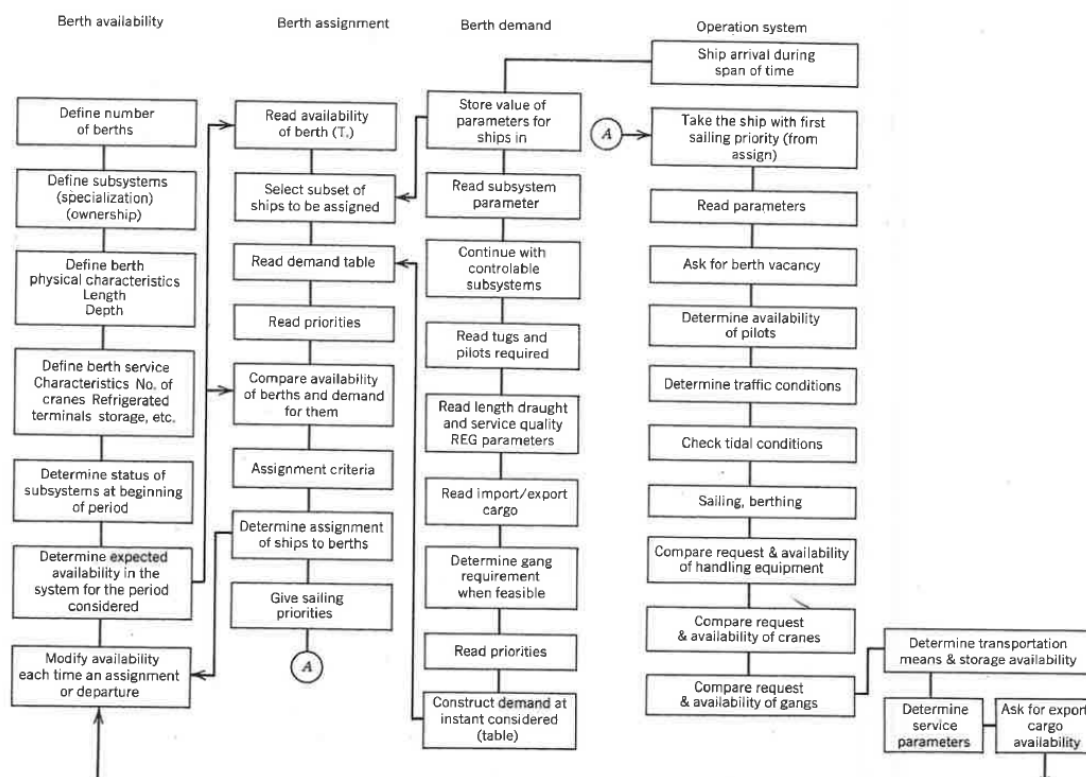
Fuente: Modelo PORT SIMULATOR del MIT, Frankel (1987)

Ilustración 18. Rutina de asignación de atraque.



Fuente: Modelo PORT SIMULATOR del MIT, Frankel (1987).

Ilustración 19. Núcleo de decisión en el módulo de simulación.



Fuente: Modelo PORT SIMULATOR del MIT, Frankel (1987).

Simultáneamente a Frankel, en la década de los años 80 algunos autores comienzan a trabajar en el desarrollo de modelos portuarios bajo herramientas de propósito general y éstos y los modelos de propósito especial comienzan a divergir de una manera clara, perdiendo interés los primeros frente a los segundos.

No será hasta bien entrada la década de los 2000 cuando nuevamente se empiezan a generar aplicaciones específicas para puertos. En este caso se trata de extensiones de software comercial de simulación de ámbito general que cuentan con bibliotecas o aplicaciones específicamente diseñadas para ambientes portuarios y, más concretamente en sus inicios, para la gestión de terminales de contenedores.

Sin embargo, todos estos modelos que comenzarían a surgir, compartirían el esquema conceptual que se ha descrito tanto en PORTSIM como en PORTMODEL o en MIT Port Simulator.

Efectivamente como indican Gambardella *et al.* (1998) al describir los modelos de simulación portuaria, éstos deben contar con al menos un modelo de planificación (módulo de “*planning*”), un módulo de demanda (módulo “*forecasting*”) y otro de operación del propio sistema (módulo

de “*simulation*”) que, sin duda, recuerdan al esquema conceptual que se ha venido definiendo en los modelos anteriores.

2.3.5 Modelos Portuarios en el Campo Militar.

En el campo militar destacan algunos modelos portuarios desarrollados para el embarque (modelos “POE” de “*Port of Embarkation*”) y desembarque (modelos “POD” de “*Port of Desembarkation*”) de tropas, vehículos y mercancías.

Como se ha comentado en la introducción de este epígrafe, de entre los POE se pueden citar el también denominado PORTSIM¹²⁶ (desarrollado por el centro *Argonne National Laboratory*¹²⁷) y descrito en Nevins *et al.* (1995, 1998a y 1998b) y dentro de los POD el CPORTS 1.4 (desarrollado por el centro *Virginia Modeling, Analysis and Simulation Center*¹²⁸) presentado en Howard *et al.* (2004).

Estos modelos se han usado tanto para la elaboración de planes de acción y contingencia (simulación de maniobras reales de embarque / desembarque y selección de puertos más apropiados) como para la toma de decisiones de inversión (qué mejoras pueden introducirse en los puertos para incrementar el rendimiento de las operaciones de embarque o desembarque).

En esencia, tienen las mismas bases metodológicas que los modelos de uso civil, donde se programan los eventos de llegadas de buques y los tiempos de servicio en la carga / descarga de material y tropas y se obtienen los resultados sobre rendimientos, duraciones y posibles cuellos de botella.

El modelo PORTSIM de uso militar, cuya primera versión data del año 1993 y cuya última versión conocida es PORTSIM5 presentada, también, en Howard *et al.* (2004), se divide conceptualmente en tres bloques: recepción, preparación y carga.

¹²⁶ No confundir con el modelo que bajo el mismo nombre pero usos civiles desarrolló el Banco Mundial y que también ha sido presentado en el presente trabajo o con aquél otro presentado en Koch (2007) que nada tiene que ver con este para usos militares y que fue desarrollado por el Oak Ridge National Laboratory en el marco de un proyecto que analizaba los rendimientos de las terminales de contenedores de Estados Unidos.

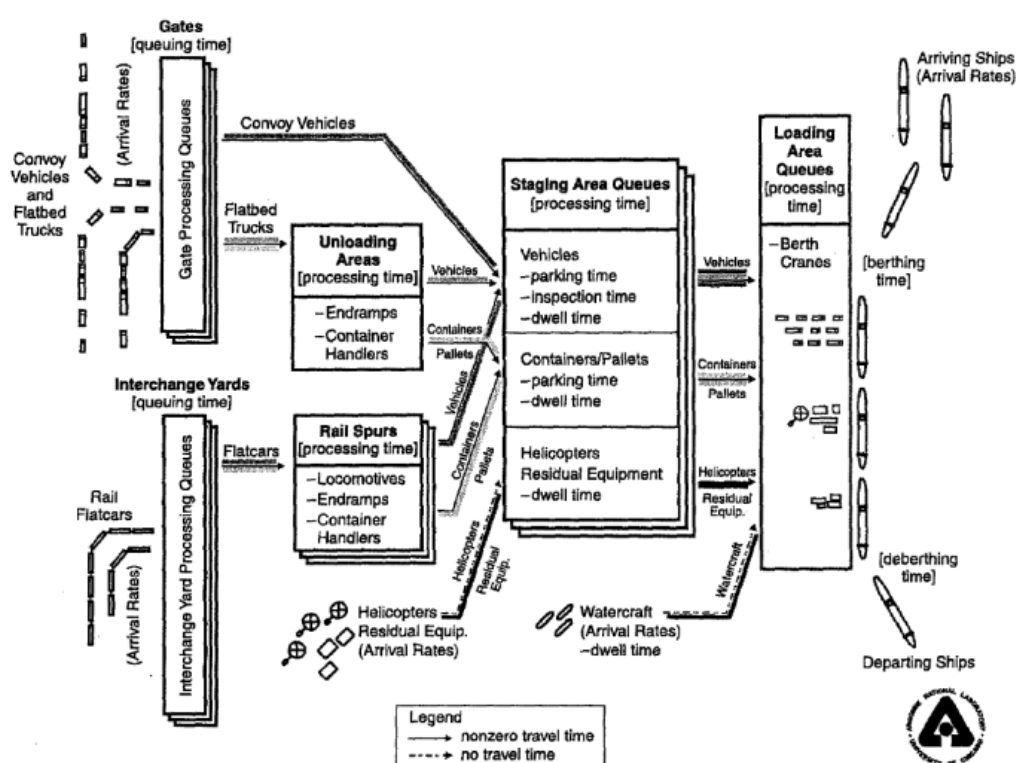
¹²⁷ El *Argonne National Laboratory* esta situado en Illinois (Estados Unidos)

¹²⁸ El *Virginia Modeling, Analysis and Simulation Center* esta situado en Virginia (Estados Unidos).

- En el bloque de recepción se modelan los recursos necesarios para que los elementos lleguen a puerto (puertas, vías de acceso, ferrocarril, patios de intercambio, etc.).
- En el bloque de preparación se modela la logística previa al embarque: inspección, formación de colas para acelerar el embarque, etc.).
- En el bloque de carga se modelan los propios recursos necesarios para proceder a la operación de carga de buques.

En la ilustración 20, extraída de Howard *et al.* (2004), se muestra el flujograma de este modelo donde se observa como se producen diferentes colas (a la llegada de buques, en el área de carga, en la zona de preparación, en las puertas de acceso al puerto y en los cambios de intercambio modal) y se definen diferentes leyes de servicio (en atraque, en las zonas de carga, en las zonas de preparación, en los equipos de manipulación, etc...), pudiéndose utilizar diferentes tipos de mercancías (contenedorizadas, unitizadas, ro-ro, granel) en un amplio rango de buques.

Ilustración 20. Flujograma de operaciones en el puerto de embarque. Modelo PORTSIM 4.3.



Fuente: Howard *et al.* (2004).

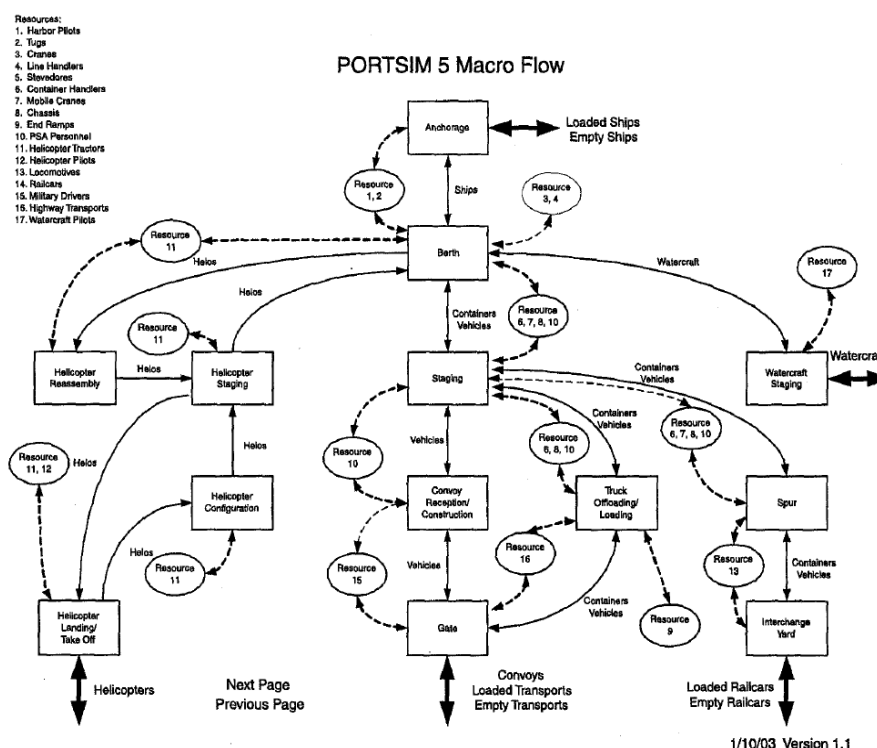
Los modelos de embarque y desembarque venían corriéndose de manera independiente aunque se tratase de modelizar una situación global en el que las tropas se embarcaban en un puerto de origen y se desembarcaran en un puerto de destino.

Para solventar este aspecto, de tal modo que los resultados de un modelo pudiesen alimentar al otro, el *Argonne National Laboratory* (Illinois, Estados Unidos) desarrolló un nuevo modelo denominado PORTSIM5 que permite la simulación conjunta de la maniobra embarque y desembarque.

Este modelo se diseñó en 2003 y se desarrolló con el lenguaje de simulación *MODSIM III*, siendo descrito con cierto grado de detalle en Howard *et al.* (2004).

En la ilustración 22 se representa el flujograma de operaciones asociados al modelo PORTSIM5 donde nuevamente puede advertirse la secuencia de actividades y la asignación de recursos.

Ilustración 22. Flujograma de operaciones. Modelo PORTSIM 5.



Fuente: Howard *et al.* (2004).

2.3.6 Otros modelos de propósito especial para modelizar entornos portuarios. Situación actual. Software comercial especializado en terminales de contenedores.

2.3.6.1 Modelos de diseño de layout CMLD: Variantes CRAFT y ALDEP.

Desde el MIT Port Simulator del año 1987 el interés en el desarrollo de modelos de propósito especial para puertos comerciales fue desvaneciéndose con el tiempo hasta encontrar un nuevo resurgir en los años 2000¹²⁹.

Efectivamente, en la década de los 90 los investigadores y analistas prefirieron usar lenguajes de programación o simulación de propósito general para desarrollar sus estudios portuarios incorporando, eso sí, las oportunas adaptaciones *ad hoc* a los entornos de simulación que quieren reproducir.

Frankel (1987) también cita como modelos de aplicación a la planificación portuaria (concretamente en lo que se refiere al diseño de la configuración de sus muelles y explanadas) los modelos genéricamente denominados CRAFT (“*Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*”) y los modelos ALDEP (“*Automated LayOut Design Program*”), todos ellos con limitada transcendencia práctica en puertos y poca repercusión científica en este campo a tenor de la práctica falta de citaciones en textos posteriores a la del propio Frankel que se pueden encontrar en búsquedas bibliográficas.

Estos métodos se engloban dentro de unas técnicas más generalistas conocidas bajo el acrónimo CMLD (“*Computerized methods of layout design*”) diseñados específicamente para la optimización de procesos de almacenamiento y que tradicionalmente se han resuelto bajo dos tipos de algoritmos diferenciados: los algoritmos constructivos (“*constructive type algorithm*”)¹³⁰ y los algoritmos de mejora (“*improvement type algorithm*”). Los CMDL basan el proceso de optimización en tres niveles de información: numérica (información sobre distancias, flujos y costes), lógica (preferencias del diseñador y relaciones entre los elementos) y gráfica (información espacial sobre el diseño de los bloques de almacenamiento).

¹²⁹ Como excepción a esta tendencia se puede citar a título de ejemplo y curiosidad el modelo de simulación portuaria del *Columbia Transport Study* desarrollado por Harvard y Brookings. Sin embargo del mismo tan sólo se ha podido encontrar una cita cruzada en Frankel (1987).

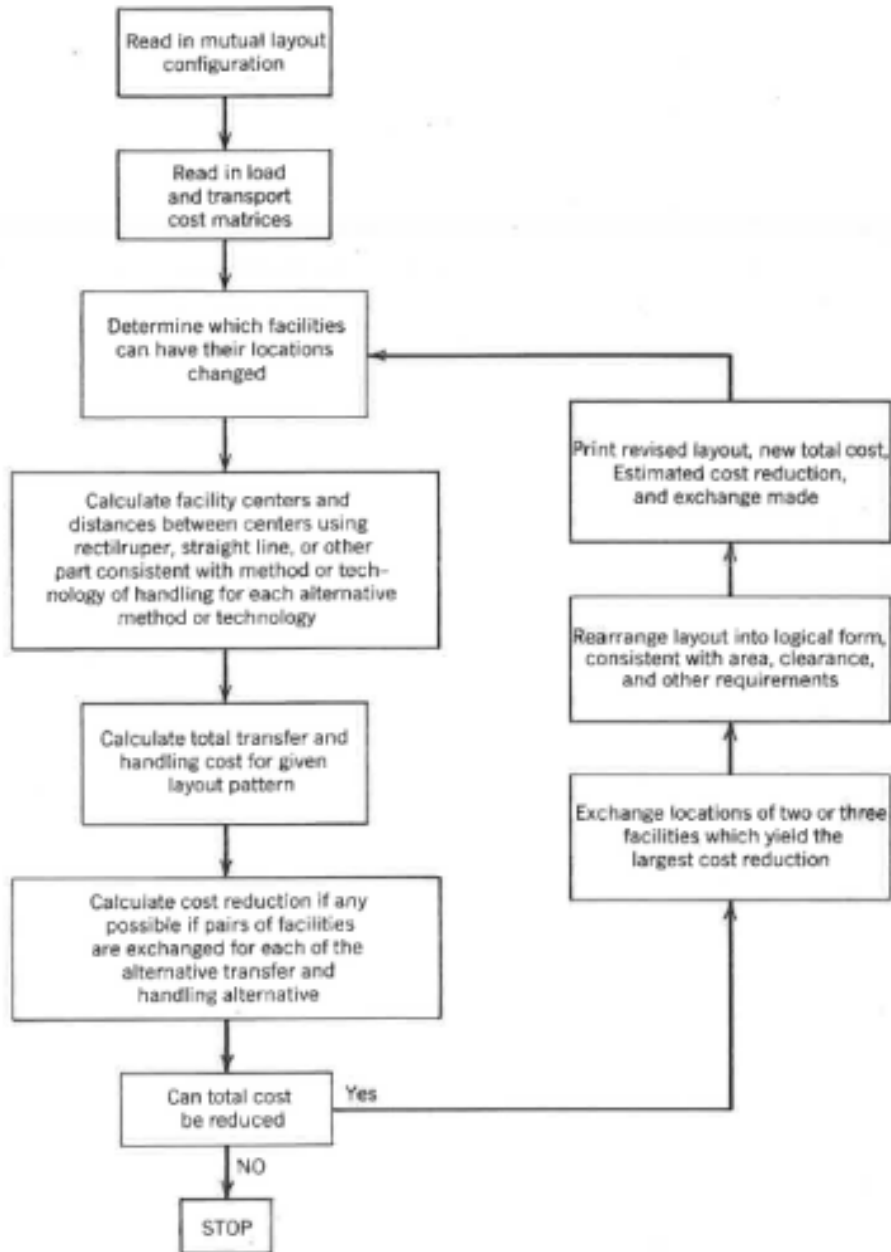
¹³⁰ Dentro de estos algoritmos la literatura científica suele reconocer dos subtipos: los ALDEP (“*Automated LayOut Design Program*”) y los CORELAP (“*Computerized Relationship Planning*”).

Los modelos CRAFT se englobarían dentro de la subclase de algoritmos de mejora arriba mencionadas y son quizás métodos más populares que los ADELP. Se trata de una técnica que iniciando la modelización desde una configuración inicial trata de optimizar el diseño a través de una reducción de los costes de transporte asociados. Estos métodos no dan respuesta a cuál es la configuración óptima pero sí dan resultados de configuraciones cuasi-óptimas que pueden ser posteriormente ajustadas por un planificador experimentado.

Para evaluar los costes de transporte se considera el volumen o flujo de material a mover, la distancia y el coste unitario asociado. Toma como hipótesis básicas del procedimiento analítico que: 1) los costes son independientes del grado de utilización de los equipos; y 2) que dichos costes tienen un comportamiento lineal con la longitud de transporte; aspectos que le hacen susceptible de una resolución analítica matricial.

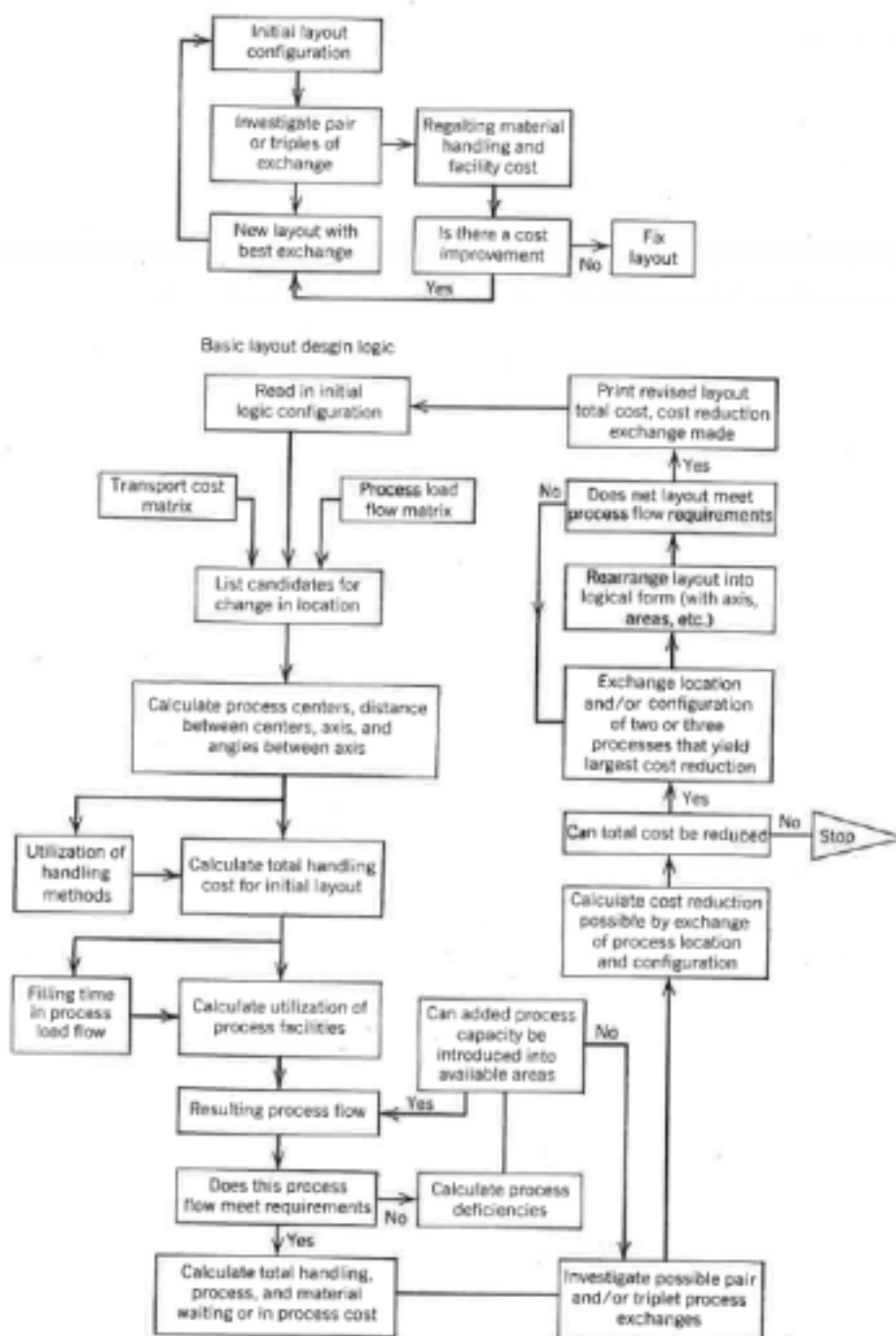
El modelo CRAFT aparece citado tanto en Frankel (1987) como en Buffa *et al.* (1964). En este último se incluye una descripción general del modelo (ilustración 23) y su aplicación al diseño de infraestructuras portuarias (ilustración 24).

Ilustración 23. Descripción general de modelo CRAFT:



Fuente: Frankel (1987) extraído de Buffa *et al.* (1964).

Ilustración 24. Programa de diseño de infraestructuras portuarias según CRAFT.



Fuente: Frankel (1987) extraído de Buffa *et al.* (1964).

Por su parte antes que Frankel (1987), los modelos ALDEP habían sido descritos en Francis y White (1974) y más tarde en Liggett (2000) quien indica que al margen de los algoritmos constructivos y de mejora antes señalados, se han utilizado algoritmos genéticos (“*Genetic algorithms*”), de enfriamiento rápido (“*Simulated annealing*”) o híbridos (“*Hybrid approaches*”), algoritmos que se anticipan aquí, pero serán nuevamente tratados en el apartado 2.4.3.

Al margen de Buffa *et al.* (1964), Francis y White (1974) y Frankel (1987) otros autores también discuten sobre estos sistemas de optimización de configuraciones en el campo del diseño industrial. Meller y Gau (1996) realizan un análisis de las tendencias y perspectivas de estos sistemas, Eneyo y Pannirselvam (1998) presentan una guía práctica para su implementación, Liggett (2000) hace una revisión bibliográfica del pasado de estas técnicas analizando su estado a la fecha de redacción y pronostica sobre evolución futura, Drira *et al.* (2007) hacen una revisión bibliográfica actualizada y, por último, John *et al.* (2013) presentan una experiencia práctica para el que se apoyan además en el software comercial ARENA®.

2.3.6.2 Desarrollo de modelos portuarios usando software comercial de propósito especial.

A finales de los años 2000, diversas casas comerciales empiezan a ofertar extensiones específicas de su software comercial especialmente diseñadas para el apoyo en la gestión portuaria, si bien y con carácter general estas son básicamente referidas a terminales de contenedores. Así se puede citar: Flexsim TC®, Simio®, ARENA®, PortOPS®, CHESSCON®, Enterprise Dynamics (ED) – Container terminal® o SIMULART-PROMODEL®.

Dentro de las aplicaciones específicas para entornos portuarios se puede destacar Flexsim TC®. Dicha extensión del programa matriz permite simular una terminal de contenedores y el usuario puede, de una manera “amigable” recrear tanto el patio de almacenamiento y su equipamiento, como el muelle y sus grúas y los accesos terrestres (carretera y ferrocarril) o marítimos (canal de navegación) reportando tanto estadísticos de operación como recrear una animación 3D¹³¹. La última versión es la FlexTerm 2.7.0 fue lanzada sobre la versión 7.7.4 de FlexSim en junio de 2016, si bien desde 2017 FlexSim ha evolucionado a una nueva versión que ya se conoce como FlexSim 2017 de la que se cuenta con un primer evolutivo lanzado en abril de 2017¹³².

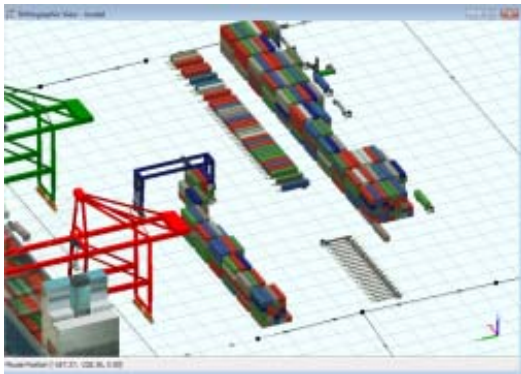
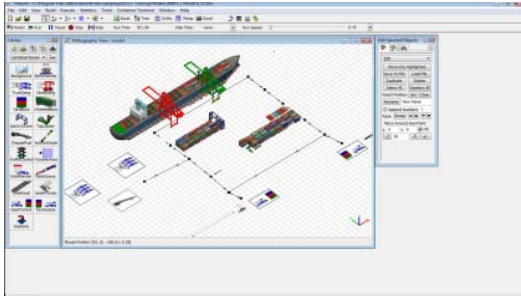
¹³¹ Ver FLEXTERM (2016a).

¹³² Ver FLEXTERM (2016b).

A continuación y a efectos ilustrativos se presentan algunas imágenes recreadas por este modelo, donde se observa tanto ejemplos de las interfaces gráficas para construcción del modelo (ilustración 25), salidas del módulo de animación que ayuda a la visualización del proceso (ilustración 26), interface para introducción y captura de datos o *inputs* al modelo (ilustración 27) y estadísticas de salidas del modelo (ilustración 28).

Más allá de la potencia del modelo y su capacidad de reflejar fielmente la operativa (no se entra a discutir en este trabajo su “bondad”), se puede destacar lo “amigable” que resulta el entorno y lo “vistoso” de sus resultados, en claro contraste de las salidas matriciales de difícil manejo de los predecesores que se han visto con anterioridad. Estas características son las que en gran medida han favorecido la extensión de estas herramientas más allá del campo científico o académico a aplicaciones prácticas concretas.

Ilustración 25. Ejemplo de interface gráfica para construcción del modelo en FLEXSIM TC ®.



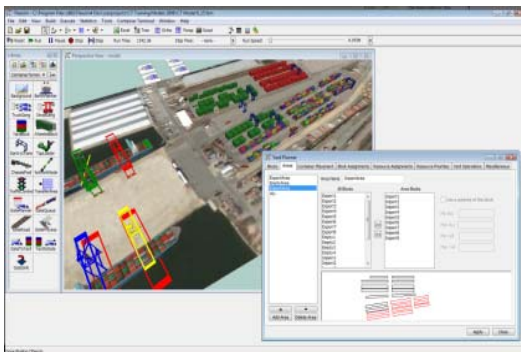
Fuente: Flexsim (2016c).

Ilustración 26. Ejemplo de interface gráfica para animación de un modelo FLEXSIM TC ®.



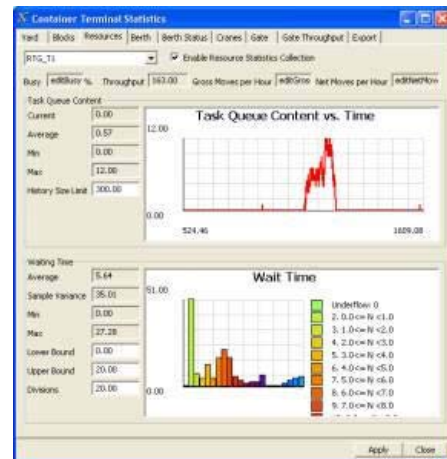
Fuente: Flexsim (2016c).

Ilustración 27. Ejemplo de interface gráfica para introducción de datos en FLEXSIM TC ®.



Fuente: Flexsim (2016c).

Ilustración 28. Ejemplo de salida de estadísticas mediante el modelo FLEXSIM TC ®.



Fuente: Flexsim (2016c).

Según sus propios desarrolladores, Flexsim CT ® se puede utilizar para mejorar muchos de los aspectos de operación de la terminal de contenedores. En concreto y entre otras:

- Aumentar el rendimiento de la terminal;
- Mejorar la utilización del equipo de la misma;
- Reducir el tiempo de espera y el tamaño de las colas;
- Reducir los cuellos de botella en la operación diaria;
- Asignar recursos a una operación de manera eficiente;
- Estudiar alternativas de inversión;
- Dar formación a los operadores de la terminal en lo que se refiere a los elementos claves del comportamiento general de la terminal como apoyo a la adopción de estrategias de operación.

Para ello, Flexsim CT ®, es capaz de analizar:

- Estrategias de apilamiento en el parque de contenedores;
- Diseño del parque y políticas de despacho;
- Logística y capacidad de los accesos de la terminal;
- Política de asignación de grúas de muelle;
- Política de asignación de equipos de manipulación en el parque;
- Políticas de asignación de atraque;
- Introducción de políticas de gestión / restricción de tráfico.

Sin necesidad de profundizar en sus detalles, otro ejemplo de extensiones de programas comerciales diseñadas específicamente para entornos portuarios se encuentra en SIMIO ®¹³³. Esta plataforma clasificada dentro de los modelos ABS permite modelar, entre otros, puertos completos, terminales o plataformas offshore. Mediante este software se puede acudir tanto a simulaciones a nivel operativo (optimización de equipamiento de la terminal) como táctico-

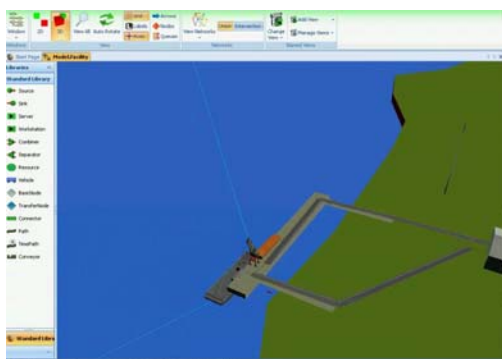
¹³³ Como se recoge en el capítulo 1 de esta tesis, SIMIO ® ha sido desarrollado en la empresa SIMIO LLC por C. Dennis Pegden, quien lideró los desarrollos de SLAM y SIMAN y más tarde del software comercial ARENA®.

estratégico (diseños de configuración óptimas) siendo por tanto una herramienta versátil tanto en las etapas de diseño preliminar como de optimización operativa posterior¹³⁴.

Este sistema ha sido probado no solamente para el diseño de terminales de contenedores, sino para un más amplio rango de aplicaciones como terminales de graneles sólidos y sistemas de descargas mediante cintas. Cuenta además con herramientas de animación 3D que permiten una presentación amistosa de resultados. Se muestran algunos ejemplos en la ilustración 29 (terminales de graneles líquidos) e ilustración 30 (terminal de contenedores).

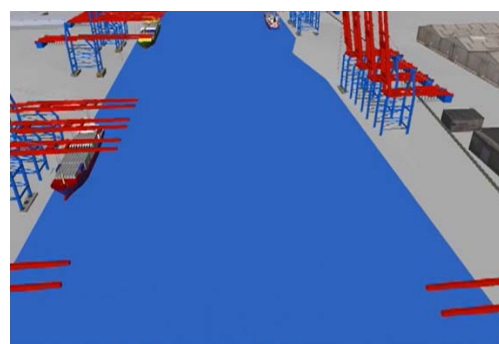
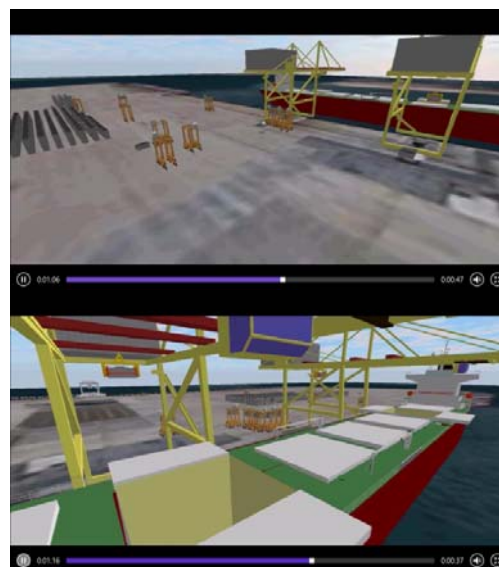
¹³⁴ Más información puede obtenerse en SIMIO (2016).

Ilustración 29. Simulación de una terminal de graneles líquidos sólidos con descarga de cintas mediante el software SIMIO ®.



Fuente: SIMIO (2016).

Ilustración 30. Simulación de una terminal contenedores mediante el software SIMIO ®.



Fuente: SIMIO (2016).

Una descripción completa del sistema (profundizando en detalles técnicos y prácticos) se recogen en Kelton *et al.* (2010), así como en las posteriores ediciones de Kelton *et al.* (2013, 2014 y 2016) y Joines y Roberts (2016).

Otro software que merece ser destacado es ARENA®, quizá uno de los más extendidos en aplicaciones prácticas concretas. Este software también permite un trabajo tanto en 2D como en 3D posibilitando la visualización de resultados mediante una herramienta de animación. ARENA® ha sido testado tanto en modelos de gran como de pequeña escala, permitiendo según sus desarrolladores resolver problemas como:

- Optimización de procedimientos de carga y descarga;
- Identificación de cuellos de botella en las operaciones portuarias;
- Determinar el tamaño / dimensión de las infraestructuras portuarias necesarias para atender un determinado volumen de tráfico;
- Evaluar distintas alternativas de diseño y de programas de operación;
- Optimizar las áreas de almacenamiento, y;
- Diseñar los requerimientos de personal y equipamiento portuario.

Más allá del tipo de aplicaciones que se acaban de citar, este software ha sido utilizado con éxito para proyectos tan variados como:

- El diseño de la expansión del canal de Panamá estudiando las limitaciones operativas, capacidad y nivel de servicio de las obras proyectadas para lo que se generaban una ley de llegadas aleatorias, se programaban unas reglas de tráfico y de secuencias de paso de barcos por esta infraestructura¹³⁵.
- La optimización de la cadena de suministro y logística asociada a las actividades marítimas de una flota de buques que servían a una terminal de papel en la costa de Canadá. Para ello se investigaba el impacto de determinados planes de operación, determinando el coste asociado a cada uno de ellos y se comparaban escenarios alternativos de programación y diseño de flotas (tipo y tamaño de buques a utilizar)¹³⁶.
- El funcionamiento y operación de una terminal de productos químicos situado en el puerto de Baytown (Texas, Estados Unidos) interactuando la llegada de barcos con determinados patrones y en distintos escenarios de composición de flota y tipo de productos y las necesidades de la planta química a la que suministraban para minimizar los costes y evitar paradas de producción por falta de suministros o fallos en cualesquiera de los eslabones de la cadena logística asociada.¹³⁷
- El diseño de una cadena logística completa de exportación asociada a un proyecto minero, en el que una compañía radicada en Australia proyectaba una exportación de 6 millones

¹³⁵ Más información sobre este proyecto se puede encontrar en ARENA (2014a).

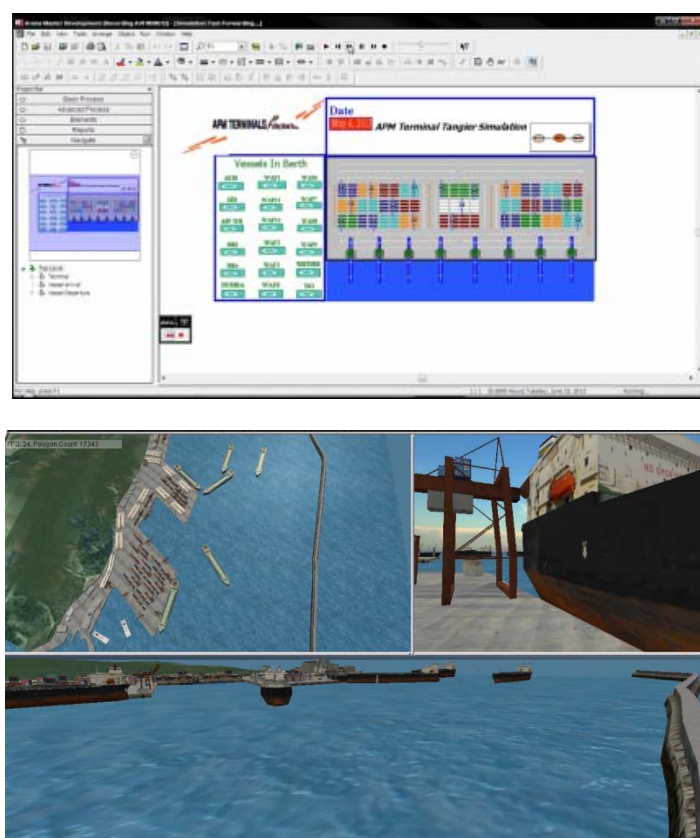
¹³⁶ Más información sobre este proyecto se puede encontrar en ARENA (2014b).

¹³⁷ Más información sobre este proyecto se puede encontrar en ARENA (2014c).

de toneladas de carbón por vía marítima. El modelo era capaz de reproducir todo el proceso desde su origen en la mina hasta su destino final en la terminal marítima de exportación pasando por el transporte mediante ferrocarril y los procesos intermedios de almacenamiento y cargas y descargas asociadas¹³⁸.

En la ilustración 31 se presentan algunos ejemplos gráficos de la modelización portuaria con esta herramienta, y sus posibilidades de visualización tanto en entornos 2D como 3D tal y como ha sido extraído de ARENA (2016).

Ilustración 31. Simulación 2D y 3D de una terminal de contenedores con el software comercial ARENA®.



Fuente: ARENA (2016).

Estas herramientas que se acaban de citar, son las más extendidas, pero no son las únicas. Así pueden encontrarse otras como las que se incluyen a continuación y sobre las que no es necesario

¹³⁸ Más información sobre el proyecto se puede consultar en SMS (2016).

extenderse ,y tan sólo se incluyen sus referencias por haber, a la fecha, tenido poco desarrollo o escasa difusión científica:

- PortOPS. Desarrollo bajo paradigma DES realizado por la firma de ingeniería AECOM¹³⁹ para su utilización en los proyectos de ingeniería y consultoría portuaria de dicha firma¹⁴⁰, tales como la expansión del puerto de Botany (Australia)¹⁴¹, la terminal de contenedores de Colombo (Sri Lanka)¹⁴² o la terminal de contenedores London Gateway (Londres, Reino Unido)¹⁴³. Dada la escasa penetración comercial o científica de dicho producto (al ser una herramienta bajo uso exclusivo de AECOM para sus proyectos) no se amplía la información sobre dicho sistema.
- CHESSCON©. Desarrollada por *Institute for Shipping Economics and Logistics (ISL GMBH)* (Bremerhaven, Alemania) específicamente diseñada para su utilización en terminales de contenedores¹⁴⁴. Esta aplicación también integra herramientas de animación y es relativamente reciente ya que la primera noticia registrada de su utilización fue en diciembre del año 2010 en el marco de las actuaciones de ampliación de la *South African Transnet Port Terminals*. Desde entonces y conforme ISL (2016a) se ha implementado en más de 50 proyectos a lo largo de todo el mundo. Chesscon ©, que en realidad es una familia de aplicaciones diferentes (Chesscon Terminal View¹⁴⁵, Chesscon Capacity¹⁴⁶, Chesscon Simulation¹⁴⁷, Chesscon Virtual

¹³⁹ Más información en AECOM (2015).

¹⁴⁰ Por las consultas realizadas no consta que dicho producto pueda adquirirse comercialmente sino que es una herramienta *ad hoc* utilizado por esta firma.

¹⁴¹ Más información en AECOM (2016a).

¹⁴² Más información en AECOM (2016b).

¹⁴³ Más información en AECOM (2016c).

¹⁴⁴ Más información en ISL (2015).

¹⁴⁵ Esta aplicación es con la que el modelador crea la terminal. Basándose en un diseño inicial en 2D permite de una manera sencilla pasar a un diseño 3D y contiene una librería de elementos pre-editados que facilitan la construcción del modelo. Véase ISL (2016c).

¹⁴⁶ Esta aplicación es la que permite evaluar la capacidad de los muelles, calcular el número óptimo de grúas y el número de *slots* necesarios para cada tipo de contenedor. Permite trabajar con diferentes tipos de barcos operando en la terminal y diferentes tipos de contenedores. Véase ISL (2016d).

¹⁴⁷ Esta aplicación permite a los operadores y consultores acoplar estrategias de operación y tácticas de manipulación buscando las mejores soluciones tanto para el diseño de terminales de nueva planta como para la optimización de terminales existentes. Véase ISL (2016e).

Terminal¹⁴⁸, Chescon Yatd View¹⁴⁹ y Chesscon Shift Preview¹⁵⁰) sobre las que se implementan diferentes módulos (ilustración 32 extraída de ISL (2015) se ha utilizado tanto en proyectos de índole estratégica (fundamentalmente decisiones de inversión y expansión de capacidad) como tácticos (optimización de las estrategias de operación) o incluso formativos (entrenamiento de operadores para la toma de decisiones) o estudios de impacto ambiental. Para consultar un listado completo de proyectos en los que se ha utilizado y las áreas de actividad en que se ha implantado se puede consultar ISL (2016b).

Ilustración 32. Principales módulos de CHESSCON.



Fuente: ISL (2015).

¹⁴⁸ Esta aplicación permite simular la totalidad de la terminal con todo su equipamiento estudiando aspectos tales como posibles medidas de optimización del equipamiento, análisis de la productividad de una configuración y equipamiento determinado, optimización de las estrategias de manipulación, evaluación de los costes de operación y/o mejora del rendimiento y formación de la plantilla de operadores. Véase ISL (2016f).

¹⁴⁹ Esta aplicación permite al simulador actuar específicamente sobre el patio de contenedores (área de almacenamiento) optimizando su inventario permitiendo el trabajo en 3D. Véase ISL (2016g).

¹⁵⁰ Esta aplicación es la herramienta “operacional” del sistema. Permite introducir los datos reales del mismo (*lay-out* y equipamiento) y programar día a día la operación importando las llegadas de camiones, trenes y barcos; los movimientos interiores de la terminal y el inventario particular en cada momento de tal manera que se reproduzcan posibles estrategias de asignación de medios para verificar los resultados (productividad, cuellos de botella, presencia de medios ociosos o infrutilizados,...) y escoger la estrategia de operación más adecuada a las circunstancias reales del sistema ayudando a anticipar las decisiones a tomar en cada momento por el operador. Se trata de una herramienta flexible y rápida que permite reproducir hasta 3.000 operaciones por minuto. Véase ISL (2016h).

- El software Enterprise Dynamics (ED) de la empresa INCONTROL *Simulation Solutions* que también permite modelizar una terminal de contenedores, pero en este caso bajo un modelo de sistemas dinámicos (SD)¹⁵¹.
- El modelo SIMULART¹⁵². Es un simulador de propósito especial para puertos comercializado dentro de la gama de aplicaciones de la casa PROMODEL. Es una herramienta cuyos orígenes según sus desarrolladores se remontan a 20 años y que surge inicialmente para estudiar cómo implementar mejoras de la productividad y reducción de costes mediante la simulación anticipada de diferentes escenarios de ampliación / dotación de equipamiento adicional en un puerto y terminal y seleccionando el óptimo de entre las alternativas manejadas. Es un software que puede utilizarse tanto para la simulación de distintas configuraciones (*layout*) como para la comprobación de los índices de productividad con diferente equipamiento o una combinación de ambos. Como en la mayoría de este tipo de herramientas el software de simulación SIMULART es capaz de detectar aquellos cuellos de botella, ineficiencias o redundancias (existencia de medios ociosos) que es preciso eliminar para optimizar el rendimiento global de la terminal. Sin embargo, a diferencia de otro software, SIMULART no se circunscribe a puertos o terminales de contenedores y se pueden realizar ejercicios de simulación en entornos muy variados, señalando sus desarrolladores en SIMULART (2013) que se han realizado ejercicios de simulación en los siguientes campos de actividad:
 - Diseño de puertos comerciales e industriales;
 - Diseño de puertos mineros;
 - Diseño de sistemas de transporte;
 - Optimización de manejo de contenedores;
 - Optimización de terminales de graneles (líquidos o sólidos);
 - Optimización de terminales carga general;
 - Diseño de layout;
 - Optimización de cadenas de suministros;

¹⁵¹ Más información sobre este producto puede encontrarse en INCONTROL (2017).

¹⁵² Véase SIMULART (2013).

- Evaluación de nuevo equipamiento;
- Planificación de operaciones;
- Análisis de capacidad;
- Evaluaciones de inversión de recursos;
- Optimización de rutas;
- Reducción de inventario, y;
- Reducción de ciclos de tiempo.

La herramienta cuenta con los hoy en día indispensables interfaces de visualización que permiten no sólo obtener la salida del modelo en forma de resúmenes de resultados (productividades, tiempos de espera, etc.) para un posterior análisis tras haber corrido el modelo; sino que posibilitan que el usuario siga la secuencia y comprenda de una manera visual cómo se comporta el sistema.

2.4 Modelos de propósito general en puertos: Visión especializada, integrada y conjunta.

2.4.1 Introducción.

Desde los inicios de la simulación, pero con mayor relevancia desde la aparición de las técnicas de programación orientada a objetos, diferentes autores dentro del campo de la programación / simulación y del mundo de la investigación operativa (“*Operational Research*” o “OR”) se han visto atraídos por la potencialidad de exportación de estas técnicas a los entornos portuarios.

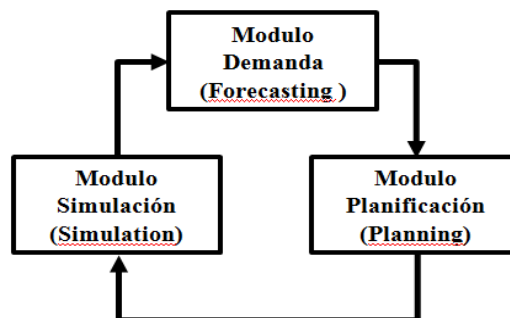
Es así que se han desarrollado todo tipo de modelos programados directamente *ad hoc* desde diferentes lenguajes de programación o simulación de carácter generalista (C++, Pascal, Fortran, Java,...), utilizando toda clase de paradigmas de programación (DES, ABS o SD); probando todo tipo de algoritmos de simulación (algoritmos genéticos, algoritmos de enfriamiento rápido, generación de escenarios Montecarlo, *branch and bound*, *branch and cut*, etc.), introduciendo

continuas mejoras en los modelos originales (eliminación de restricciones inherentes a los primeros modelos desarrollados).

Todos los modelos portuarios, no obstante, presentan una arquitectura relativamente parecida, independientemente del lenguaje, paradigma o algoritmos que utilicen.

Gambardella *et al.* (1996), Rizzoli *et al.* (1997), Bontempi *et al.* (1997) y Gambardella *et al.* (1998) han implementado de forma muy sencilla la arquitectura modular simple que deben contener los modelos portuarios *ad hoc*, basados por un lado en un módulo donde se genera la demanda durante todo el periodo que dure el paso de la simulación (módulo de “*forecasting*”), un módulo donde se pueda describir el propio sistema y establecer las relaciones que rigen las interrelaciones, y se disponga de algoritmos de asignación de órdenes y prioridades (módulo de “*planning*”) y, por último, un módulo donde tomando los *inputs* de uno y de otro se pueda realizar la simulación propiamente dicha (módulo de “*simulation*”). El mismo se presenta en la ilustración 33.

Ilustración 33. Arquitectura del Sistema Modular para modelo de simulación portuario.



Fuente: Elaboración propia basado en Gambardella *et al.* (1996 y 1998). Rizzoli *et al.* (1997) y Botempi (1997).

En aplicaciones prácticas concretas aplicables al caso de terminales intermodales de contenedores el primero de los módulos (*forecasting*) es presentado por Gambardella *et al.* (1996), el segundo (*planning*) por Bontempi *et al.* (1997) y, el último, (*simulation*) por Gambardella *et al.* (1998). Estos autores (todos del mismo grupo de investigación) desarrollan un caso de estudio en la terminal de contenedores de La Spezia (Italia) proporcionando unos resultados de interés no sólo académico o teórico sino testados en un ambiente real y arrojando una aplicación práctica.

Estos autores no son, sin embargo, los primeros que desarrollan un modelo portuario utilizando herramientas de modelización de propósito general (más adelante se volverá sobre casos específicos presentados en la década de los 70 y los 80).

En efecto, desde sus orígenes esta variante de modelos portuarios fue desarrollada de manera paralela a los de propósito especial estando más enfocados a resolver problemas concretos y específicos que en desarrollar aplicaciones generales extrapolables a un conjunto amplio de entornos portuarios (propósito especial).

El modelo de simulación portuaria que desarrolló Frankel en 1987 dentro del MIT fue prácticamente contemporáneo con el de propósito específico que plantea Park y Noh (1987) para el caso de terminales de graneles. Este último se basaba en un generador de escenarios Montecarlo que se usaba para simular la futura capacidad económica de un puerto y poder atender la demanda proyectada en un cierto horizonte de planificación. En la primera parte, el modelo determina los efectos provocados por la expansión portuaria y, en la segunda, se evaluaba los efectos económicos relacionados con el cambio de capacidad portuaria. Este modelo fue testado para el desarrollo de los proyectos de expansión del puerto de Mobile (Alabama, Estados Unidos).

Anteriormente, Schonfeld y Sharafeldien (1985) desarrollaron un modelo centrado en la optimización de la asignación de atraques y minimización de los tiempos de espera de los buques (problema que se conoce como "*berth allocation problem*" o "BAP") pero al tiempo también resolvía la asignación grúas de muelle (también denominado en literatura científica como "*quay crane allocation problem*" o simplifadamente "QCAP"), programación de grúas de muelle (referenciado como "*quay crane scheduling problem*" o simplifadamente "QCSP"), o reparto de grúas en barcos ("*crane split*"), aspectos estos últimos que también tratará Daganzo (1989).

Otros autores como Shields (1984) y Sculli y Hui (1988) trataban de resolver con sus modelos la optimización de la estiba y planes de carga de buques ("*stowage planning*" o "*Master Bay Plan Problem*" (MBPP).

Se pueden citar investigadores anteriores como Koenigsberg y Lam (1976), Ronen (1983) y Daskin y Walton (1983) que centraron sus estudios en Optimización de flota, líneas marítimas y transbordos ("*routing*", "*vessel scheduling*", "*shipping scheduling*" y "*transshipment optimization*")

Easa (1987), por su parte, trata en su modelo de optimizar los servicios portuarios de remolque en un entorno específico sometido a una fuerte congestión de tráfico.

Aun existiendo referencias bibliográficas de los años 70 y 80 tal y como se acaba de ver, las simulaciones bajo herramientas de propósito general se desarrollan de manera extraordinaria a partir de los años 90; fundamentalmente con la explosión del tráfico de contenedores y la necesidad de optimización de estas terminales y, aún mucho más, a partir del siglo XXI. A continuación, se citan ejemplos específicos.

2.4.2 Clasificación de subproblemas de simulación portuaria de propósito general.

2.4.2.1 Enfoque especializado o de resolución aislada de problemas de planificación portuaria usando modelos simulación.

Para Meersmans y Dekker (2001) los problemas de planificación portuaria en terminales de contenedores se podrían discretizar en una serie de actividades, algunas de los cuales ya han sido anticipados. A continuación, además de enumerarlas se introduce su expresión literal y acrónimos en inglés que podrá ayudar a buscar las referencias que se citan a continuación, ya que, habitualmente, la literatura científica sobre este campo de actividad se relaciona a través de dichos acrónimos.

- Planes de carga / optimización de estiba en buques (“*stowage planning*”).
- Asignación de atraque y grúas de muelle al buque (“*berth and crane allocation*”).
- Carga de contenedores y transporte en muelle de los mismos (“*container loading and quay transport*”):
 - Programación de grúas pórtico en patio de almacenamiento (“*schedunling of stacking cranes*”).
 - Programación de vehículos automáticos (“*schedunling of AGV’s*¹⁵³”).
 - Control de tráfico de los vehículos automáticos (“*traffic control of AGV’s*”).

¹⁵³ AGV es el acrónimo de “*Automatic Guided Vehicle*”.

- Programación integrada de vehículos automáticos y grúas pórtico (“*integrated scheduling of stacking cranes and AGV’s*”).
- Programación de straddles carriers (“*scheduling of straddle carriers*”).
- Apilamiento (“*stacking*”).
- Diseño global de terminales (“*overall container terminal design*”):
 - Playa de vías (“*rail terminals*”).
 - Diseño en planta de la terminal y transporte de contenedores (“*terminal layout and transportation*”).

La investigación de Meersmans y Dekker (2001) ha sido actualizada y ampliada por Vis y De Koster (2003) y Steenken *et al.* (2004) quienes continuando con la clasificación anterior proponen una agrupación de estudios en cuatro bloques y en varios sub-bloques.

Esta clasificación ha sido ampliamente aceptada en el campo científico y viene siendo usada hasta la fecha sirviendo de base para otros estudios compilatorios posteriores entre los que cabe citar Shi y Voß (2007), Vacca *et al.* (2007), Stahlbock y Voß (2008) y Carlo *et al.* (2014a, 2014b y 2015).

Shi y Voß (2007), en una referencia que puede consultarse en Bichou *et al.* (2013) aprovechan un estudio en el que discuten la relación entre las alianzas y líneas marítimas con las terminales portuarias de contenedores para actualizar las referencias bibliográficas aportadas por Steenken *et al.* (2004); mientras que Vacca *et al.* (2007) y Stahlbock y Voß (2008) presentan, directamente, una nueva revisión actualizada de la literatura científica en relación a las operaciones en las terminales de contenedores aceptando como válida la misma estructura propuesta por Steenken *et al.* (2004).

La clasificación propuesta por Steenken *et al.* (2004) se presenta a continuación:

- Proceso de planificación del buque (“*ship planning process*”):
 - Optimización de asignación de atraque (“*BAP*”).
 - Planificación de la estiba del buque/planes de carga (“*stowage planning*”).
 - Asignación de grúas a diferentes buques en muelles (“*crane scheduling*”) o reparto de grúas dentro de las bodegas o secciones de un mismo barco (“*crane split*”).

- Logística de superficies y almacenamiento en terminales (“*storage and stacking logistics*”).
- Optimización del transporte, sus medios, y ciclos de movimientos (“*transport optimization*”):
 - Movimientos de medios de manipulación en muelle (“*quayside transport*”) tales como stradle carriers, tractores, etc.
 - Movimientos de medios de modo terrestre en terminales (“*landside transport*”) tales como flota de camiones sirviendo a una terminal, composiciones de ferrocarril, etc.
 - Optimización de los movimientos de grúas pórtico en parque de depósito (“*crane transport optimization*” o “*crane optimization*”).
- Sistemas de simulación (“*simulation systems*”), que corresponden a lo que se denominará problemas de enfoque global (por diferenciación entre enfoque aislado o integrado de subproblemas) y que se repasa en otros apartados de esta tesis doctoral (véase apartado 2.4.2.3).

Simultánea a la revisión realizada por Steenken *et al.* (2004) y de igual modo interesante es el trabajo de revisión y compilación bibliográfica aportado por Dai *et al.* (2004) que finalmente aparecería publicada en Dai *et al.* (2008). Estos autores centran su investigación para el caso específico de asignación de atraque (“BAP”) en terminales de contenedores y el interés radica en que no se limitan a relacionar diferentes fuentes y estudios anteriores si no que hacen un juicio crítico de las limitaciones y simplificaciones de cada uno de los estudios, lo que ayuda a interpretar el campo de ampliación idóneo para cada caso y la bondad de los resultados que se obtengan.

Vacca *et al.* (2007) realizan una nueva revisión bibliográfica que agrupan en este caso en cinco actividades diferentes asociadas a otros tantos problemas de planificación. A saber:

- Proceso de planificación del buque (“*ship planning process*”):
- Asignación de atraques (“BAP”).
- Programación de grúas de muelle (“QCSP”).
- Operaciones en patio (“*yard operations*”).
- Operaciones de transferencia (“*transfer operations*”) incluyendo movimientos de AGV’s, stradle carriers o trucks desde patio a muelle.

- Planes de carga / estiba (“*ship stowage planning*”).

Carlo *et al.* presentan un extenso trabajo de revisión de la literatura científica en este campo que dividen en una serie de tres artículos diferentes (uno para las operaciones en parque o “*landside*” (Carlo *et al.* 2014a), otro para las operaciones de transferencia interna o “*transport*” (Carlo *et al.* 2014b) y uno para las operaciones en muelle o “*seaside*” (Carlo *et al.* 2015). En esta serie realizan una detallada revisión y proponen una nueva clasificación y categorización de problemas en base a una serie de atributos específicos de cada problema y que enfocan como una ampliación de los estudios Steenken *et al.* (2004) y por lo tanto abarcan las publicaciones de otros autores en el periodo 2004-2013.

Como resumen de lo recogido en las referencias y estudios que se acaban de citar se ha incluido a continuación una revisión bibliográfica extensa sobre el estado del arte en la resolución de problemas portuarios mediante técnicas de simulación (tabla 8) en la que se han ampliado las fuentes citadas por dichos autores con otras adicionales, representando dicha tabla una de las mayores aportaciones de la presente tesis doctoral (en total se ofrecen en el entorno de 500 citas).

Tabla 8. Referencias bibliográficas en relación al enfoque especializado o de resolución aislada de problemas de planificación portuaria usando modelos simulación.

Tipo de Problema	Autor
Optimización de la asignación de atraques a buques y minimización de los tiempos de espera de buques (“ <i>berth allocation problem</i> ” o “ <i>BAP</i> ”)	Schonfeld y Sharafeldien (1985). Lai y Shih (1992). Brown <i>et al.</i> (1994). Loh (1996). Lim (1998). Lim (1999). Chen (1998). Chen y Hsieh (1999). Chia <i>et al.</i> (1999). Tong <i>et al.</i> (1999). Nishimura <i>et al.</i> (2001). Imai <i>et al.</i> (2001). Guan <i>et al.</i> (2002). Park y Kim (2002). Henesey <i>et al.</i> (2002). Kim y Moon (2003). Imai <i>et al.</i> (2003). Park (2003). Park y Kim (2003). Guan y Cheung (2004). Dai <i>et al.</i> (2004). Cordeau <i>et al.</i> (2005a). Imai <i>et al.</i> (2005). Dragović <i>et al.</i> (2005a).

Tipo de Problema	Autor
	<p> Dragović <i>et al.</i> (2005b). Moorthy y Teo (2006). Meisel y Bierwirth (2006). Dragović <i>et al.</i> (2006a). Wang y Lim (2007). Imai <i>et al.</i> (2007). Cheong <i>et al.</i> (2007). Monaco y Sammarra (2007). Cordeau <i>et al.</i> (2007). Imai <i>et al.</i> (2008a). Imai <i>et al.</i> (2008b). Aykagan (2008). Chang <i>et al.</i> (2008). Chen <i>et al.</i> (2008). Dai <i>et al.</i> (2008). Giallombardo <i>et al.</i> (2008). Mauri <i>et al.</i> (2008). Zhou y Kang (2008). Hansen <i>et al.</i> (2008). Lee y Chen (2009). Meisel y Bierwirth (2009). Bierwirth y Meisel (2009). Meisel y Bierwirth (2009). Zeng y Yang (2009). Liang <i>et al.</i> (2009). Na y Zhihong (2009). Bierwirth y Meisel (2010). Gao <i>et al.</i> (2010). Han <i>et al.</i> (2010). Chang <i>et al.</i> (2010). Zhang <i>et al.</i> (2010b). Cheong <i>et al.</i> (2010). Giallombardo <i>et al.</i> (2010). Arango <i>et al.</i> (2010). Ali <i>et al.</i> (2011). Barros <i>et al.</i> (2011). Raa <i>et al.</i> (2011). Umang <i>et al.</i> (2011). Buhrkal <i>et al.</i> (2011). Zhen <i>et al.</i> (2011). van Schaeren <i>et al.</i> (2011). Ma <i>et al.</i> (2012). Kordic <i>et al.</i> (2012). Robenek <i>et al.</i> (2012). Song <i>et al.</i> (2012). Yang <i>et al.</i> (2012). </p>

Tipo de Problema	Autor
	<p>Viera <i>et al.</i> (2012). Arango <i>et al.</i> (2012a). Arango <i>et al.</i> (2012b). Lalla-Ruiz <i>et al.</i> (2012). Abdel Hafez <i>et al.</i> (2013). Abdel Hafez y Eltawil (2013). Abdel-Fattah <i>et al.</i> (2013). Eltawil (2013). Zampelli <i>et al.</i> (2013). Elwany <i>et al.</i> (2013). Arango <i>et al.</i> (2013). Umang <i>et al.</i> (2013). Rashidi y Tsang (2013). Türkoğulları <i>et al.</i> (2014). Peng <i>et al.</i> (2015). Kordic <i>et al.</i> (2015). Bierwirth y Meisel (2015). Budipriyanto <i>et al.</i> (2015). Iris <i>et al.</i> (2015). Kordic <i>et al.</i> (2016). Bridi <i>et al.</i> (2016). Alzaabi y Diabat (2016). Ribeiro <i>et al.</i> (2016).</p>
Asignación grúas de muelle (“ <i>quay crane allocation problem</i> ” o simplificada-mente “ <i>QCAP</i> ”), programación de grúas de muelle (“ <i>quay crane scheduling problem</i> ” o simplificada-mente “ <i>QCSP</i> ”), o reparto de grúas en barcos (“ <i>crane split</i> ”)	<p>Schonfeld y Sharafeldien (1985). Daganzo (1989). Daganzo (1990a). Peterkofsky y Daganzo (1990). Gambardella <i>et al.</i> (1998). Mastrolilli <i>et al.</i> (1998). Zaffalon y Gambardella (1998). Daganzo (1999). Rizzoli <i>et al.</i> (1999b). Gambardella y Rizzoli (2000). Gambardella <i>et al.</i> (2001). Lim <i>et al.</i> (2002a). Lim <i>et al.</i> (2002b). Bish (2003). Park (2003). Park y Kim (2003). Kim y Park (2004). Lim <i>et al.</i> (2004a). Lim <i>et al.</i> (2004b). Lim <i>et al.</i> (2004c). Zhu y Lim (2004). Cordeau <i>et al.</i> (2005b). Goodchild y Daganzo (2005).</p>

Tipo de Problema	Autor
	<p> Moccia <i>et al.</i> (2006). Ng y Mak (2006). Jung y Kim (2006). Jung <i>et al.</i> (2006). Liu <i>et al.</i> (2006). Zhu y Lim (2006). Meisel y Bierwirth (2006). Choo (2006). Goodchild y Daganzo (2006). Sammorra <i>et al.</i> (2007). Goodchild y Daganzo (2007). Legato <i>et al.</i> (2008). Aykagan (2008). Chen <i>et al.</i> (2008). Kang <i>et al.</i> (2008). Lee <i>et al.</i> (2008). Giallombardo <i>et al.</i> (2008). Zhou y Kang (2008). Imai <i>et al.</i> (2008b). Bierwirth y Meisel (2009). Meisel y Bierwirth (2009). Zeng y Yang (2009). Legato <i>et al.</i> (2009). Na y Zhihong (2009). Tavakkoli-Moghaddam <i>et al.</i> (2009). Choo <i>et al.</i> (2010). Chang <i>et al.</i> (2010). Biertwirth y Meisel (2010). Cao <i>et al.</i> (2010). Han <i>et al.</i> (2010). Zhang <i>et al.</i> (2010b). Meisel y Bierwirth (2011). Chen <i>et al.</i> (2011). Ali <i>et al.</i> (2011). Raa <i>et al.</i> (2011). van Schaeren <i>et al.</i> (2011). Legato <i>et al.</i> (2011). Kaveshgar <i>et al.</i> (2012). Ma <i>et al.</i> (2012). Chung y Choy (2012). Song <i>et al.</i> (2012). Yang <i>et al.</i> (2012). Zhao <i>et al.</i> (2012). Abdel-Fattah <i>et al.</i> (2013). Abdel Hafez <i>et al.</i> (2013). Abdel Hafez y Eltawil (2013). </p>

Tipo de Problema	Autor
	Guan <i>et al.</i> (2013). Chung y Chan (2013). Lajjam <i>et al.</i> (2013). Eltawil (2013). Elwany <i>et al.</i> (2013). Zampelli <i>et al.</i> (2013). Türkoğulları <i>et al.</i> (2014). Karam <i>et al.</i> (2014). Iris <i>et al.</i> (2015). Bierwirth y Meisel (2015). Zhang <i>et al.</i> (2017).
Programación de medios terrestres y de manipulación en terminales (“ <i>truck queues</i> ”, “ <i>Yard Trucks Scheduling</i> ”, “” ...) y asignación de medios terrestres a grúas de muelle.	Radmilović (1996). Gambardella <i>et al.</i> (1998). Mastrolilli <i>et al.</i> (1998). Zaffalon <i>et al.</i> (1998). Rizzoli <i>et al.</i> (1999b). Gambardella y Rizzoli (2000). Gambardella <i>et al.</i> (2001). Steenken <i>et al.</i> (2001). Meersmans (2002). Kim <i>et al.</i> (2003). Ng (2005). Ng y Mak (2005). Bish <i>et al.</i> (2005). Ng <i>et al.</i> (2007). Cao <i>et al.</i> (2008). Kang <i>et al.</i> (2008). Lee <i>et al.</i> (2008). Canonaco <i>et al.</i> (2008). Lee <i>et al.</i> (2009a). Cao <i>et al.</i> (2010). Munisamy (2010). Wang <i>et al.</i> (2013b). Xue <i>et al.</i> (2013).
Optimización de superficies y parques de almacenamiento / Gestión del apilamiento (“ <i>storage and stacking logistics</i> ”, “ <i>storage allocation</i> ”, “ <i>yard location assignment</i> ” o “ <i>yard operations</i> ”)	Castilho y Daganzo (1993). Cao y Uebe (1993). Taleb-Ibrahimi <i>et al.</i> (1993). Crainic <i>et al.</i> (1993). Cao y Uebe (1995). Radmilović (1996). Kim (1997). Kim y Kim (1998). Kim y Bae (1998). Cheung <i>et al.</i> (1998). Kim y Kim (1999a). Chen (1999).

Tipo de Problema	Autor
	Kim y Kim (1999a). Kozan y Preston (1999). Holguín-Veras y Jara-Díaz (1999). Kim <i>et al.</i> (2000). Zhang (2000). Bish <i>et al.</i> (2001). Preston y Kozan (2001). Kim y Kim (2002). Shabayek y Yeung (2002). Kim y Park (2003). Zhang <i>et al.</i> (2003). Chen <i>et al.</i> (2003). Chen y Chao (2004). Kozan y Preston (2006). Lee <i>et al.</i> (2006). Kim y Hong (2006). Kim y Lee (2006). Kang <i>et al.</i> (2006). Yang y Kim (2006). Lee y Hsu (2007). Ng <i>et al.</i> (2007). Cao <i>et al.</i> (2008). Kim <i>et al.</i> (2008). Lee <i>et al.</i> (2008). Lee y Chao (2009). Lee <i>et al.</i> (2009a). Kim <i>et al.</i> (2009). Ayachi <i>et al.</i> (2010). Lee y Lee (2010). Zhang <i>et al.</i> (2010a). Zhao y Goodchild (2010). Park <i>et al.</i> (2011). Sauri y Martin (2011). Zhen <i>et al.</i> (2011). Robenek <i>et al.</i> (2012). Xue <i>et al.</i> (2013). Wang <i>et al.</i> (2013b).
Optimización del transporte interno de una terminal (“ <i>transfer operations</i> ”, “ <i>quayside transport</i> ”, “ <i>stradle carrier optimizacion</i> ”,...) y automatización de terminales (“ <i>Automated Guided Vehicle</i> ” o “ <i>AGV’s</i> ”)	Steenken <i>et al.</i> (1993). Evers y Koppers (1996). Ulusoy <i>et al.</i> (1997). Kim y Bae (1999). Kim y Kim (1999a). Kim y Kim (1999b). Rebollo <i>et al.</i> (2000). Bruno <i>et al.</i> (2000). Moorthy y Hock-Guan (2000).

Tipo de Problema	Autor
	<p> Böse <i>et al.</i> (2000). Reveliotis (2000). Gademann y van de Velde (2000). Qiu y Hsu (2000). Duinkerken y Ottjes (2000). Bish <i>et al.</i> (2001). Carrascosa <i>et al.</i> (2001). Chan (2001). Cheng (2001). Li y Vairaktarakis (2001). Meersmans y Wagelmans (2001a). Meersmans y Wagelmans (2001b). Qiu y Hsu (2001a). Qiu y Hsu (2001b). Qiu y Hsu (2001c). Wallace (2001). Vis <i>et al.</i> (2001). Martinssen <i>et al.</i> (2001). van der Heijden <i>et al.</i> (2002). Meersmans (2002). Henesey y Törnquist (2002). Liu <i>et al.</i> (2002). Qiu <i>et al.</i> (2002). Hanafi <i>et al.</i> (2003). Moorthy <i>et al.</i> (2003). Saanen (2003). Schneidereit <i>et al.</i> (2003). Hartmann (2003). Lim <i>et al.</i> (2003). Grunow <i>et al.</i> (2004). Chang <i>et al.</i> (2004). Vis y Harika (2004). Kim <i>et al.</i> (2004). Li y Vairaktarakis (2001). Kim y Bae (2004). Liu <i>et al.</i> (2004). Yang <i>et al.</i> (2005). Vis <i>et al.</i> (2005). Cheng <i>et al.</i> (2005). Hoshino <i>et al.</i> (2005). Briskorn <i>et al.</i> (2006). Henesy <i>et al.</i> (2006b). Henesy <i>et al.</i> (2007). Kozan y Preston (2006). Kim <i>et al.</i> (2006). Lhemann <i>et al.</i> (2006). </p>

Tipo de Problema	Autor
	Vis (2006). Lee <i>et al.</i> (2007). Chen <i>et al.</i> (2007). Lau y Zhao (2008). Nguyen y Kim (2009). Li <i>et al.</i> (2010b). Vis y Carlo (2010). Bae <i>et al.</i> (2011). Park <i>et al.</i> (2011). Siroky (2011). Tian <i>et al.</i> (2011). Wang <i>et al.</i> (2013b). Yan <i>et al.</i> (2014).
Optimización de los movimientos de grúas pórtico en parque de depósito (“ <i>crane transport optimization</i> ”, “ <i>yard crane scheduling</i> ” – “YCSP” o “ <i>granty crane optimization</i> ”, “ <i>yard cranes allocation</i> ”,)	Daganzo (1990a). Peterkofsky y Daganzo (1990). Lai y Lam (1994). Lai y Leung (1996). Kim y Kim (1997). Kim y Kim (1998). Kim y Kim (1999a). Kim y Kim (1999b). Lin (2000). Cheung <i>et al.</i> (2002). Kim y Kim (2002). Kim <i>et al.</i> (2002). Narasimhan y Palekar (2002). Zhang <i>et al.</i> (2002). Eisenberg <i>et al.</i> (2003). Kim y Kim (2003). Kim <i>et al.</i> (2003). Linn y Zhang (2003). Ng (2005). Ng y Mak (2005a). Ng y Mak (2005b). Ng y Tsang (2005). Ng <i>et al.</i> (2006). Jung y Kim (2006). Lee <i>et al.</i> (2008). Cao <i>et al.</i> (2008). Guo y Huang (2008). Mak y Sun (2009). Kim <i>et al.</i> (2009). Guo <i>et al.</i> (2009a). Guo <i>et al.</i> (2009b). Lee <i>et al.</i> (2009a). Stahlbock y Vo� (2010).

Tipo de Problema	Autor
	Javanshir y Seyedalizadeh (2010). He <i>et al.</i> (2010). Speer <i>et al.</i> (2011). Guo <i>et al.</i> (2011). Li <i>et al.</i> (2012). Yang <i>et al.</i> (2013). He <i>et al.</i> (2013).
Optimización de la estiba y planes de carga de buques (“ <i>stowage planning</i> ” o “ <i>Master Bay Plan Problem (MBPP)</i> ”)	Shields (1984). Sculli y Hui (1988). Aslidis (1989). Imai y Miki (1989). Aslidis (1990). Botter y Branati (1991). Avriel y Penn (1993). Chen <i>et al.</i> (1995). Ambrosino y Sciomachen (1998). Avriel <i>et al.</i> (1998). Davies y Bischoff (1998). Winter y Zimmermann (1998). Wilson y Roach (1999). Scheithauer (1999). Winter (1999). Wilson y Roach (2000). Avriel <i>et al.</i> (2000). Haghani y Kaisar (2001). Wilson <i>et al.</i> (2001). Steenken <i>et al.</i> (2001). Imani <i>et al.</i> (2002). Ambrosino <i>et al.</i> (2004). Dubrovsky <i>et al.</i> (2002). Eley (2002). Roach y Wilson (2002). Kang y Kim (2002). Giemsch y Jellinghaus (2003). Eley (2003). Ambrosino <i>et al.</i> (2004). Imani <i>et al.</i> (2006). Ambrosino <i>et al.</i> (2006). Sciomachen y Tanfani (2007). Delgado y Jensen (2009). Ning y Weihian (2009). Xiao <i>et al.</i> (2009). Aye <i>et al.</i> (2010). Fan <i>et al.</i> (2010). Zeng <i>et al.</i> (2010). Ambrosino <i>et al.</i> (2010).

Tipo de Problema	Autor
	Tavares de Azevedo <i>et al.</i> (2012). Hu <i>et al.</i> (2012). Tavares de Azevedo <i>et al.</i> (2013). Zhao <i>et al.</i> (2013). Moura <i>et al.</i> (2013). Tavares de Azevedo <i>et al.</i> (2014).
Movimientos de medios de modo terrestre en terminales (“ <i>landside transport</i> ”) tales como flota de camiones sirviendo a una terminal, composiciones de ferrocarril, estudio de playa de vías...	Steenken (1992). Steenken <i>et al.</i> (1993). Van Zijderverld (1995). Powell y Carvalho (1998). Kozan (1997a). Kozan y Preston (1999). Rizzoli <i>et al.</i> (1999a). Steenken (1999). Kozan (2000). Rizzoli <i>et al.</i> (2002). Steenken (2003). Kim <i>et al.</i> (2003). Koo <i>et al.</i> (2004).
Optimización de Consumos / Costes de Operación en buques y terminales portuarias	Schrady y Vassian (1996). Alarcón <i>et al.</i> (2012). Vilhelmsen <i>et al.</i> (2013).
Optimización de flota, líneas marítimas y transbordos (“ <i>routing</i> ”, “ <i>vessel scheduling</i> ”, “ <i>shipping scheduling</i> ” y “ <i>transshipment optimization</i> ”)	Koenigsberg y Lam (1976). Ronen (1983). Daskin y Walton (1983). Ronen (1983). Rana y Vickson (1991). Christiansen y Nygreen (1998). Fagerholt (1999). Vis y de Koster (2003). Christiansen <i>et al.</i> (2004). Fagerholt (2004a). Fagerholt (2004b). Baird (2006). Cordeau <i>et al.</i> (2007). Christiansen <i>et al.</i> (2007). Fagerholt y Lindstad (2007). Vacca <i>et al.</i> (2007). Chen <i>et al.</i> (2007). Agarwal y Ergun (2008). Christiansen y Fagerholt (2008). Christiansen <i>et al.</i> (2009). Fagerholt <i>et al.</i> (2011). van Vianen <i>et al.</i> (2012c). Fagerholt y Ronenb (2013). Fagerholt <i>et al.</i> (2013).

Tipo de Problema	Autor
	Moura <i>et al.</i> (2013). Vilhelmsen <i>et al.</i> (2013). Zhao <i>et al.</i> (2013).
Optimización en la gestión de contenedores vacíos (“ <i>empty container allocation problem</i> ”)	Crainic <i>et al.</i> (1993). Shen y Khoong (1995). Cheung y Chen (1998). Shabayek y Yeung (2002). Choong <i>et al.</i> (2002). Leung <i>et al.</i> (2003). Lam <i>et al.</i> (2007). Di Francesco (2007). Suban y Twrdy (2008). Bandeira <i>et al.</i> (2009). Brouer <i>et al.</i> (2011). Chen y Wang (2013).
Programación de manos portuarias / Estiba (“ <i>Manpower scheduling</i> ”)	Avriel <i>et al.</i> (1998). Hartmann (2004). Legato y Mónaco (2004).
“ <i>Container Loading Problem</i> ”	George y Robinson (1980). Bischoff y Marriot (1990). Bischoff y Ratcliff (1995). Bischoff <i>et al.</i> (1995). Gehring y Bortfeldt (1997). Bortfeldt y Gehring (1998). Davies y Bischoff (1998). Ratcliff y Bischoff (1998). Prais y Ribeiro (2000). Bortfeldt y Gehring (2001). Eley (2002). Pisinger (2002). Gehring y Bortfeldt (2002). Bortfeldt <i>et al.</i> (2003). Delorme <i>et al.</i> (2003). Gehring <i>et al.</i> (2003). Eley (2003). Mack <i>et al.</i> (2004). Moura y Oliveira (2005). Hoshino <i>et al.</i> (2005). Bischoff (2006). Parreño <i>et al.</i> (2007). Fanslau y Bortfeldt (2010). Zhang <i>et al.</i> (2010a). Fosters y Bortfeldt (2012). Bortfeldt y Wäscher (2013).

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las referencias bibliográficas citadas en la anterior tabla, las técnicas de simulación han encontrado el mayor campo de expansión científica en las terminales de contenedores y sólo más recientemente y aún en un estado de desarrollo menos avanzado en las terminales de graneles, terminales de carga general, terminales ro-ro, etc... siendo éste uno de los campos en los que se proponen investigaciones futuras con el objetivo de recopilar el estado del arte en relación a este específico subcampo de actividad.

De igual modo en la tabla anterior se han agrupado referencias conforme los tipos de problemas más comunes que pueden encontrarse. No obstante, la variedad de investigaciones *ad hoc* que pueden abordarse con la simulación es inmensa e implican temas muy variados. Por citar algún ejemplo se puede citar el estudio de los servicios portuarios¹⁵⁴ o los análisis económicos ante ruptura de elementos de manipulación de mercancía¹⁵⁵.

2.4.2.2 Visión integrada simple o de resolución combinada de problemas de simulación en entornos portuarios.

Con el desarrollo de las técnicas de simulación y el incremento de la potencia computacional diversos autores han ido resolviendo en un único modelo varios de los subproblemas que se han analizado en los puntos anteriores. A esto se denomina visión integrada simple o de resolución combinada de problemas de simulación en entornos portuarios.

Diferentes autores asumen que en función de las características de lo que se quiere abordar alguno de los problemas anteriores no se pueden aislar y dos o más de los subproblemas se deben modelizar de una manera combinada. Para ello utilizarán diversas técnicas, por ejemplo, los métodos de redes o cadenas markovianos.

Zhang *et al.* (2003) señalan que las decisiones operacionales en una terminal¹⁵⁶ son múltiples y unas y otras están interrelacionadas. La resolución conjunta (total o parcial mediante varios subproblemas) se abordan, usualmente, mediante una aproximación jerárquica en la que el modelo se descompone o rompe en los diferentes elementos que ya se han expuesto anteriormente, de tal modo que la salida de un subproblema de un nivel superior puede tomarse como la entrada del siguiente en un nivel más inferior. En esta referencia bibliográfica, los autores continúan con la lógica simplificada que el autor principal representaba de manera gráfica mediante el siguiente esquema enunciado de manera detallada en Zhang (2000) (tesis doctoral) o en un artículo previo

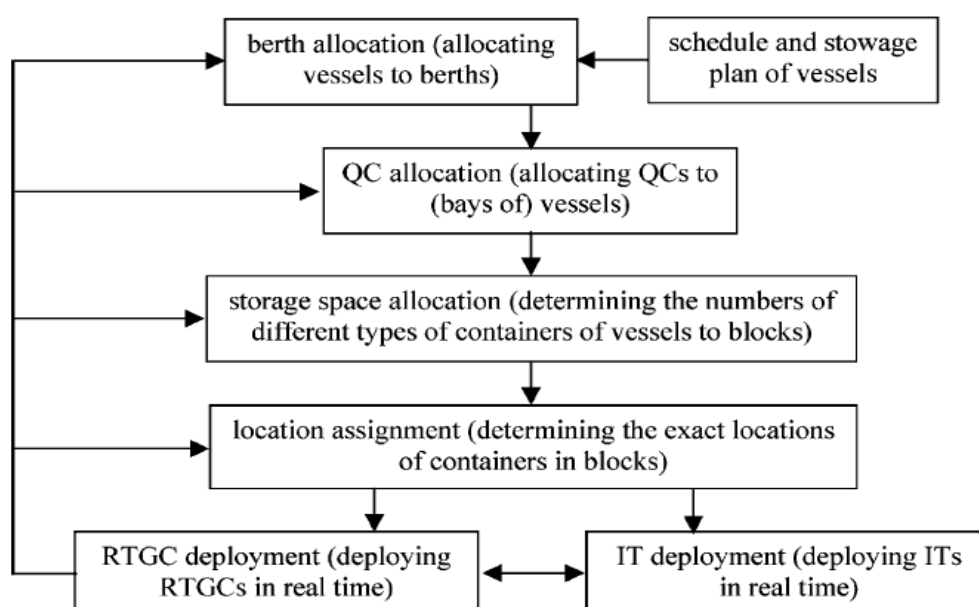
¹⁵⁴ Así, por ejemplo, Easa (1997) aborda el dimensionamiento de los medios de remolque de un puerto.

¹⁵⁵ En este apartado destacan Mennis *et al.* (2008).

¹⁵⁶ Se refieren también estos autores a terminales de contenedores, pero esto es generalizable a cualquier tipo de terminal aunque sea de una manera más simplificada.

de Murty *et al.* (2000) y que arranca con la resolución, en primera instancia, de una subrutina de BAP alimentado por un plan de estiba y una programación de carga, para continuar con una QCAP, y siguiendo en un tercer nivel con la asignación de espacios en la terminal para bloques de contenedores y la asignación de *slots* concretos a contenedores específicos (ilustración 34). Todas las subrutinas están interconectadas con la utilización de medios de transferencia terrestre (estos autores se refieren solo a RTGC's¹⁵⁷ pero siendo posible sustituir éstos en el esquema por cualquier otro equipamiento que tenga la terminal AGV's, ALV's, stradle carriers, camiones tractores conducidos, etc.).

Ilustración 34. Estructura jerárquica en la resolución combinada de problemas de simulación portuaria.



Fuente: Zhang (2000).

Las investigaciones más destacadas en las que se aborda la integración de los problemas de asignación de atraque (BAP) y de programación o asignación de grúas en muelle (QCSP o QCAP) son las de Park (2003), Park y Kim (2003), Meisel y Bierwirth (2006), Imai *et al.* (2007), Aykagan (2008), Giallombardo *et al.* (2008), Zhou y Kang (2008), Chen *et al.* (2008), Imai *et al.* (2008b), Bierwirth y Meisel (2009), Meisel y Bierwirth (2009), Zeng y Yang (2009), Liang *et al.* (2009), Chang *et al.* (2010), Na y Zhihong (2009), Han *et al.* (2010), Bierwirth y Meisel (2010), Zhang *et al.* (2010b), Raa *et al.* (2011), Ali *et al.* (2011), van Schaeren *et al.* (2011), Ma *et al.* (2012), Yang *et al.* (2012), Song *et al.* (2012), Abdel Hafez *et al.* (2013), Abdel Hafez y Eltawil

¹⁵⁷ RTGC es el acrónimo del inglés *Rubber Tired Gantry Crane*.

(2013), Abdel-Fattah et al. (2013), Eltawil (2013), Elwany et al. (2013), Vaca et al. (2013), Zampelli et al. (2013), Zhang et al. (2014), Türkoğulları et al. (2014), Iris et al. (2015) y Bierwirth y Meisel (2015).

Pero este ejemplo de tratamiento combinado de problemas que representa el BAP con el QCAP, si bien es el más común en la literatura científica, no es el único ejemplo.

Otros autores como Bish et al. (2001), Kozan y Preston (2006), Lee et al. (2008) y Lee et al. (2009a) combinan los movimientos de transferencia dentro de la terminal desde el patio al frente del muelle (*transfer operations*) con los propios procesos de asignación de espacio en el parque (*yard block allocation*), problema de integración que ya había sido expuesto por Radmilović (1996) al tratar de una manera integrada maquinaria de manipulación y superficies de depósito.

En la serie de artículos Goodchild y Daganzo (2005, 2006 y 2007) los autores centran sus investigaciones en el doble ciclo que conforman las grúas de muelles con las operaciones de estiba y planes de carga de los barcos. En este apartado se pueden también citar los trabajos de Chen et al. (2007), Lee et al. (2008) y Lau y Zhao (2008) quienes estudian de una manera integrada todos los procesos de programación de los equipos de manipulación de la terminal y grúas de muelle.

Dragović et al. (2009b) abordan conjuntamente la integración de la signación de atraques con la simulación del parque de almacenamiento (“*yard simulation planning*”) problema que es también abordado por Cheng et al. (2010) está vez desde un enfoque de sistema dinámicos SD en vez de la tradicional aproximación DES.

Cao et al. (2010) resuelven de manera conjunta la asignación de grúas de muelle con los medios terrestres para manipulación de las descargas (en un problema que denominan “*integrated quay crane and yard truck schedule problem*”).

Lee et al. (2011) resuelven de manera conjunta o integrada la asignación de superficies (*bay allocation o yard block allocation*) con la programación de grúas de patio (*yard crane schedulling*).

Lee et al. (2012), analizan el problema de asignación de espacios en el patio con la programación de llegada de barcos para el caso de una terminal feeder con visitas cíclicas o periódicas.

Robenek et al. (2012) y Peng et al. (2015) modelizan conjuntamente el problema de asignación de atraque (BAP) con la ocupación de superficies en explanadas (*yard assignment*) para el caso de terminales de graneles. Estas investigaciones son una continuación de los trabajos de Umang et al. (2011) en lo que se refiere al problema de asignación de atraques en este tipo de terminales.

Este mismo problema de integración entre asignación de muelle y optimización de superficies es abordado por Zhen *et al.* (2011) pero, en este caso, para terminales hub de contenedores.

Wang *et al.* (2013b), por otro lado, abordan el problema de almacenamiento en patio (por ellos enunciado como *storage allocation* pero que conceptualmente coincide con *bay allocation* o *yard block allocation*) con el de programación de medios terrestres de manipulación (*yard trucks scheduling*) utilizando como técnica los algoritmos genéticos.

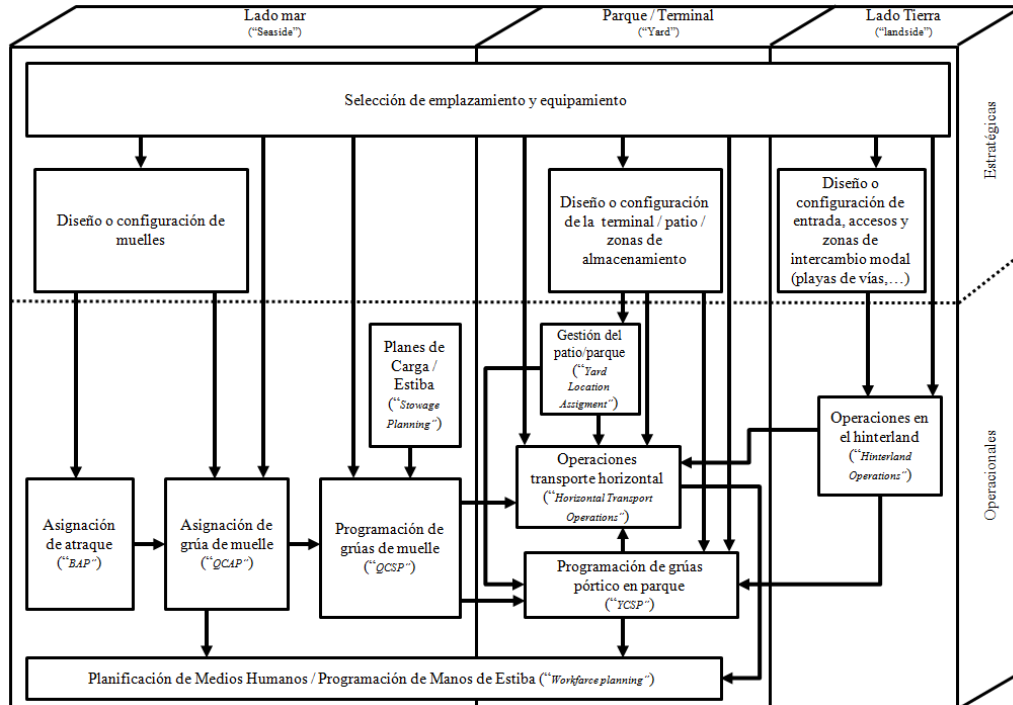
Por ultimo cabría destacar los estudios en los que se aborda conjuntamente el problema de los planes de estiba o carga de buques (*stowage planning*) con los de ruta de barcos (*routing*) como sería el caso de Moura *et al.* (2013) y Zhao *et al.* (2013).

2.4.2.3 Visión global o de resolución conjunta de problemas de planificación portuaria usando modelos simulación.

Vacca *et al.* (2007) en el último apartado de su trabajo se refieren a la visión de simulación global en la que se tratan todos los elementos de la terminal y se modelizan en su conjunto como un sistema único. Inicialmente, otros autores habían incidido también en estas técnicas, entre ellos: Gambardella *et al.* (1998), Legato y Mazza (2001), Maione y Ottomanelli (2005), Henesey (2006a), Canonaco *et al.* (2008) y Munisamy (2010).

Bierwirth y Meisel (2010) abordaron la conexión entre los diferentes problemas de planificación y propusieron un esquema matricial de interrelación en el que definían tres zonas especiales (lado mar, lado tierra e interfase mar-tierra) y dos niveles de planificación (estratégica y operativa) tal y como se muestran en la ilustración 35.

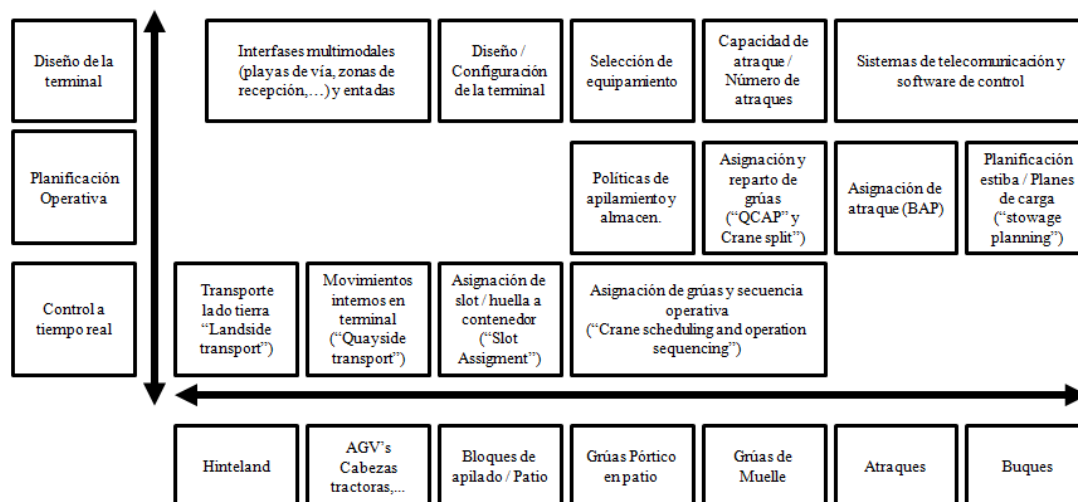
Ilustración 35. Esquema matricial de planificación portuaria aplicada a terminales de contenedores.



Fuente: Elaboración propia basada en Bierwirth y Meisel (2010).

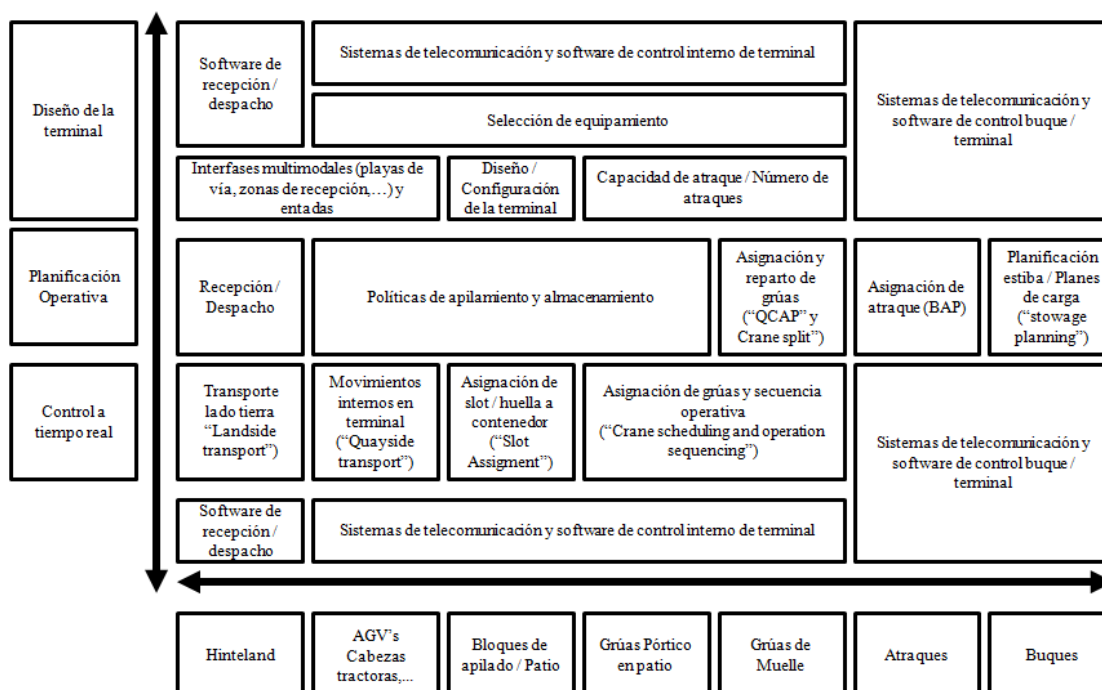
Dicho esquema es una evolución del presentado por Günther y Kim (2006) quienes definían tres diferentes niveles de planificación (diseño de la terminal, planificación operativa y control en tiempo real) y ocho elementos sobre los que actuaban (comenzando por el hinterland y acabando por el barco y pasando entre ellos por los atraques, grúas, medios de manipulación, parque de almacenamiento, etc.). A continuación, se representa este esquema simplificado propuesto por los autores (ilustración 36), así como uno de elaboración propia inspirada en los anteriores, pero haciéndolo evolucionar (ilustración 37).

Ilustración 36. Niveles de Planificación en una terminal de contenedores.



Fuente: Günther y Kim (2006) y recogidos por Vacca et al. (2007).

Ilustración 37. Niveles de Planificación en una terminal de contenedores.



Fuente: Elaboración propia evolucionando el modelo presentado por Günther y Kim (2006).

2.4.3 Algoritmos de programación utilizados en los modelos *ad hoc* portuarios.

Hasta este momento se han descrito los modelos de propósito general aplicados a entornos portuarios (indistintamente que en su programación se utilicen lenguajes de programación, lenguajes de simulación o simuladores propiamente dichos). Para ello se ha utilizado la clasificación clásica de estos problemas bajo la perspectiva de:

- Resolución individual de alguno de los subproblemas que son inherentes en este campo (BAP, QCAP, YCSP,...);
- Resolución de manera combinada abordando dos o más de estos subproblemas; y
- Resolución conjunta de todos los problemas presentes en un puerto (modelo global portuario).

Sin que sea el objetivo de esta tesis entrar en especificaciones técnicas de resolución de dichos problemas, es necesario comentar, aunque sea sucintamente que muchos son los algoritmos¹⁵⁸ concretos que han venido siendo utilizados en la programación de los mismos cuando lo que se utilizan son directamente lenguajes de programación o simulación o que están inherentes en determinados simuladores para permitir resolver el escenario simulado.

De una manera muy resumida, los algoritmos tratan de buscar una solución óptima a un determinado problema mediante el análisis de millones de escenarios o posibilidades distintas. La generación de esta gran cantidad de escenarios es la que se resuelve mediante diferentes técnicas de programación y la virtud de un algoritmo concreto se basa en poder evaluar cuantas más posibilidades sea posible en el menor tiempo posible. Efectivamente, cuantos más escenarios se sometan a análisis, más probabilidad hay de que la solución hayada (óptima) esté más cerca a la mejor solución posible y cuanto menor sea el tiempo en que tarda en encontrarla, menor será el coste del modelo (evaluando en términos de tiempo).

Tal y como pone de manifiesto Abd El-Nasser *et al.* (2013a) en sus estudios de optimización del puerto de Alejandría (Egipto), las operaciones en una terminal de contenedores son muy complejas comprometiendo un elevado número de interacciones altamente dinámicas. Estos autores caracterizan los procesos de una terminal de estas características como estocásticas, no

¹⁵⁸ Conforme Wikipedia - ALG (2016) un algoritmo es “un conjunto prescrito de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permite llevar a cabo una actividad mediante pasos sucesivos que no generen dudas a quien deba hacer dicha actividad. Dados un estado inicial y una entrada, siguiendo los pasos sucesivos se llega a un estado final y se obtiene una solución.”

lineales del tipo *NP-hard*¹⁵⁹ requiriendo la implementación de algoritmos heurísticos para resolver los problemas de optimización combinatoria que producen.

Muchos son los algoritmos meta-heurísticos que se han utilizado para resolver los problemas de simulación en estos ambientes destacando, según estos mismos autores, los algoritmos genéticos, algoritmos tabú, y los denominados “*simulated annealing*” por su conveniencia para encontrar una solución óptima en el espacio de soluciones globales. Como se verá, si bien éstos son los más extendidos, no son los únicos.

A continuación se utilizarán los estudios de algunos autores en el campo portuario para ir explicando los algoritmos utilizados en este subsector de actividad, más con un propósito enumerativo que descriptivo pues analizar con detenimiento las características técnicas de los algoritmos enunciados entraría más en otro campo de investigación que en el que está inspirado esta tesis.

Por lo tanto, se hará una breve descripción de los principales algoritmos a través de sus experiencias concretas de los cuales se citarán a sus autores; ya que quizá sea la mejor manera de extraer valor en una información muy técnica para alguien que, como nosotros, es realmente ajeno al proceloso campo de la programación y las técnicas computacionales.

En primer lugar, el algoritmo más genérico en este tipo de planteamientos, tanto por ser pionero como por su transcendencia científica posterior y su aplicación a diferentes campos, es el método Montecarlo.

El método de Montecarlo es un modelo estadístico numérico (no determinístico) enunciado en 1944 y desarrollado para usos militares que se ha extendido de una manera muy notable en el campo civil con el desarrollo de la computadora.

En esencia, el método se usa para aproximar expresiones matemáticas complejas cuya evaluación con exactitud no es posible o es muy costosa (en términos de potencia de cálculo) y mediante el mismo se pueden encontrar soluciones aproximadas a una multitud de diferentes problemas de ingeniería, economía u otras ciencias sociales. Como norma general se utiliza para realizar

¹⁵⁹ Narasimhan y Palekar (2002) habían clasificado previamente los algoritmos por ellos desarrollados para el análisis del *transstainer rounting problem* como *NP-completo*. En teoría de la complejidad computacional, NP es el acrónimo en inglés de *nondeterministic polynomial time* y se trata del conjunto de problemas que pueden ser resueltos en tiempo polinómico por una máquina de Turing no determinista. Se define una convención con familias de problemas con cuatro tipos de siglas: *NP-completo* (significa problemas que son completos en NP, es decir, los más difíciles de resolver en NP), *NP-hard* (problemas al menos tan complejos como NP pero no necesariamente en NP); *NP-easy* (problemas como mucho tan difícil como NP pero no necesariamente en NP); y *NP-equivalente* (igualmente difícil que NP pero no necesariamente en NP).

investigaciones sobre la base de experimentos muestrales mediante la generación de series pseudo-aleatorias en una computadora.

Una de las ventajas de este método es que el error absoluto de la estimación decrece con el número de puntos evaluados (“N”) mediante la relación $1/N^{1/2}$ en virtud del teorema central del límite.

Su aplicación al ámbito portuario es muy antiguo encontrándose realizaciones ya en los años 80 como la de Park y Noh (1987), en los años 90 como la de Cyr (1992) que investiga para la petrolera Chevron la logística asociada a su transporte de graneles líquidos y más recientes como la de Bugaric y Petrovic (2007) en relación al tráfico de graneles sólidos y Alali y Al-Bazi (2013) demostrando que pese a su “antigüedad” es un método que se utiliza aún en nuestros días y cuenta con plena vigencia.

Siguiendo con esta descripción a través de la utilización en ambientes portuarios de diferentes algoritmos por distintos autores, podrían destacarse los trabajos de Bontempi *et al.* (1997) y Gambardella *et al.* (1998), que aplicaron un sistema de modelización a terminales intermodales de contenedores que en esencia se basaba en el acoplamiento de tres módulos: uno de proyección de tráfico, un segundo de planificación operativa y un tercero de simulación propiamente dicha y en la que testaban los resultados del modelo con los datos reales de la terminal de La Spezia (Liguria, Italia). En este modelo mediante el módulo de proyección se estimaba el tráfico del sistema y en el módulo de planificación se utilizaba para generar políticas de gestión del patio de almacenamiento, asignación de recursos y scheduling. El rendimiento/eficacia de dichas políticas es analizado en el modelo de simulación.

Estos investigadores utilizaron tanto algoritmos de búsqueda tabú, como algoritmos genéticos, y técnicas de programación dinámicas.

Los algoritmos de búsqueda tabú, atribuidos a Fred Glover¹⁶⁰, son herramientas de optimización matemática que pertenecen a los que se denominan técnicas de búsqueda local. Una vez que una solución es determinada se marca como “tabú” de modo que el algoritmo no vuelve a visitar esta posible solución y por lo tanto acelera el rendimiento de búsqueda de otras posibles soluciones. Se ha utilizado para resolver el que se conoce como el “*problema del viajero*” que consiste en buscar el orden óptimo (mínimo recorrido) que debe seguir un viajero que tiene que visitar varias ciudades. El algoritmo tabú busca una primera solución y va creando nuevas soluciones con nada más que cambiar el orden de las ciudades que se han visitado y va midiendo la distancia recorrida

¹⁶⁰ Profesor de ciencias de computación de la Universidad de Colorado (Estados Unidos) nacido en Kansas (Estados Unidos) en 1937.

en cada caso registrando cual es la solución más corta. Obviamente encuentra su aplicación portuaria en las distancias recorridas para el movimiento y remociones de contenedores en el área de manipulación y depósito.

La referencia más antigua de utilización de estos algoritmos tipo “tabú” en entorno marítimo portuario se puede encontrar en Bortfeldt y Gehring (1998), que hacen una aplicación práctica para la resolución del caso “*Container Loading Problem*” y que más tarde ampliarían en Bortfeldt *et al.* (2003). Con misma fecha Bruzzone y Signorile (1998) habían publicado su trabajo en el que utilizaban este algoritmo para la planificación de estiba y configuración del parque de almacenamiento.

Para más detalles de la aplicación de este algoritmo en el caso marítimo-portuario se puede consultar también Fagerholt (2004a y 2004b), Cordeau *et al.* (2005a), Fagerholt y Lindstad (2007), Sammarra *et al.* (2007), Chen *et al.* (2007), Mak y Sun (2009), Wong y Kozan (2010), Korsvik y Fagerholt (2010), Korsvik *et al.* (2010), Fagerholt *et al.* (2011), Øvstebøa *et al.* (2011a y 2011b), Arango *et al.* (2012a y 2012b), Lalla-Ruiz *et al.* (2012) y Fagerholt *et al.* (2013).

Los algoritmos genéticos, también utilizados para encontrar soluciones al “*problema del viajero*” mencionado con anterioridad; fueron desarrollados por Jhon Henry Holland¹⁶¹ en los años 70 inspirados en las reglas de evolución genética por las que una población va evolucionando de una manera aleatoria, pero en el que sólo los mejores especímenes de dicha población (los más adaptados) sobreviven.

En el campo matemático y de simulación se generan diferentes soluciones posibles por variación de las variables que lo definen y a través de un algoritmo que mide el rendimiento se van seleccionando las mejores y descartando las peores. Cuanto mayor es el número de soluciones que se generen, mayor es la probabilidad de que se encuentre el óptimo o mejor de todos (algo que, obviamente, sólo se puede garantizar en el caso de que se testaran infinitas soluciones).

Los principios básicos de los algoritmos genéticos fueron establecidos por Holland (1975), y existe una buena descripción de los mismos en Goldberg (1989), Davis (1991), Michalewicz (1992) y Reeves (1993).

En la aplicación de algoritmos genéticos al campo portuario fueron pioneros Gehring y Bortfeldt (1997) para resolver el “*Container Loading Problem*”, trabajos que continuarían en Bortfeldt y Gehring (2001), Gehring y Bortfeldt (2002), Bortfeldt *et al.* (2003) y Bontempi *et al.* (1997)

¹⁶¹ John Henry Holland nacido en 1929 es considerado uno de los pioneros en sistemas complejos y ciencia no lineal y padre del algoritmo genético. Es profesor de Filosofía, de Ingeniería Eléctrica y de Ciencias de la computación en la Universidad de Michigan (Estados Unidos).

quienes construyen un modelo global para la gestión de una terminal intermodal y que continuarían en Gambardella *et al.* (1998).

Su extrapolación al campo portuario ha sido un poco más tardía pero muy extensa. Algunos autores que han usado algoritmos genéticos en el desarrollo de modelos de simulación portuario al margen de los ya citados como pioneros se pueden mencionar: Bruzzone y Signorile (1998), Nishimura *et al.* (2001), Bortfeldt y Gehring (2001), Dubrovsky *et al.* (2002), Gehring y Bortfeldt (2002), Roach y Wilson (2002), Dahal *et al.* (2003), Tsang (2003), Fagerholt (2004a), Dahal *et al.* (2005), Ng y Tsang (2005) Yue *et al.* (2006), Ng *et al.* (2007), Zhou y Kang (2008), Kumar y Omkar (2008), Mak y Sun (2009), Lee *et al.* (2009b), Ayachi *et al.* (2010), Javanshir y Seyedalizadeh (2010), He *et al.* (2010), Gudelj *et al.* (2010), Korsvik y Fagerholt (2010), Ma *et al.* (2012), Moussi *et al.* (2012a y 2012b), Kaveshgar *et al.* (2012), Chung y Choy (2012), Chung y Chan (2013), Wang *et al.* (2013b), Zhang *et al.* (2013) y Peng *et al.* (2015).

La programación dinámica introducida por Richard Enrnest Bellman¹⁶² en 1953 es un sistema para reducir el tiempo de ejecución de algoritmos mediante lo que denominó la utilización de subproblemas superpuestos y subestructuras óptimas. Una subestructura óptima significa que se pueden usar soluciones óptimas de subproblemas para encontrar la solución óptima del problema en su conjunto. Los subproblemas se resuelven a su vez dividiéndolos en subproblemas más pequeños hasta que se alcance el caso fácil, donde la solución al problema es trivial. Como ejemplo típico de este algoritmo se suele también presentar el “*problema del viajero*” o el “*problema del grafo*” que trata de encontrar el camino más corto en un grafo uniendo distintos puntos. El algoritmo comienza probando las soluciones desde los puntos adyacentes más cercanos al punto de origen y escogiendo el mejor camino entre ellos.

La programación dinámica ha sido también tratada en el ámbito portuario, más allá de las referencias de Botempi *et al.* (1997) y Gambardella *et al.* (1998), por Jin *et al.* (1999), Ainouche y Smati (2002), Jin y Gao (2006), Lam *et al.* (2007), Öñüt y Saglam (2008), Guo y Huang (2010a y 2010b), Guo *et al.* (2011) y Alarcón *et al.* (2012).

Estos algoritmos, si bien son los más utilizados, no son, sin embargo, los únicos que se han utilizado en la literatura científica, así Legato *et al.* (2008) y Moussi *et al.* (2015) utilizan los denominados algoritmos de recocido (o enfriamiento) simulado (traducción del inglés “*simulated annealing*”) y las técnicas de búsqueda denominadas A-BEES (“*adaptive balanced explorative and exploitative search*”), para la resolución práctica de un problema de programación y

¹⁶² Richard E. Bellman (1920-1984) estudió matemáticas en las Universidades de Brooklyn (Nueva York, New Jersey, Estados Unidos) y Wiscosin (Wiscosin, Estados Unidos) y un doctorado en esa misma disciplina en la Universidad de Princeton (New Jersey, Estados Unidos) ejerciendo la docencia en la Universidad Sur de California (California, Estados Unidos).

optimización del número de grúas en una terminal de contenedores. Otros como Rustell (2014) utilizan una subvariante de los algoritmos de búsqueda de raíces ("*root-finding algorithm*")¹⁶³ conocido como Método Brent.

Un algoritmo de recocido (o enfriamiento) simulado ("*simulated annealing*" o SA)¹⁶⁴ es un algoritmo que trata de buscar una buena aproximación o solución óptima dentro de un espacio de búsqueda muy grande (muchos posibles estados que dificultan la búsqueda de soluciones). A este valor óptimo se lo denomina "óptimo global". Su nombre se toma del proceso industrial de recocido del acero y cerámicas, que consiste en una primera fase de calentamiento para luego proceder a un enfriamiento lento en el que se propicia la variación de sus propiedades físicas. El algoritmo trata por tanto de replicar el proceso químico por el cual el calor causa que los átomos aumenten su energía desplazándose de sus posiciones iniciales (que corresponden con un estado local de mínima energía); el enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recrystalizar en configuraciones con aún menor energía que la inicial (mínimo global).

Este algoritmo está menos referenciado que otros en planificación portuaria quizá por algunas de sus limitaciones entre las que Ingber (1993) destacaba que resulta demasiado lento o por estar basado más en "intuiciones físicas" que en un rigor matemático.

Legato *et al.* (2008) recrearon este método en la dinámica de una terminal de contenedores (con la ayuda del software comercial Arena ®) y dejaron correr el modelo hasta que el sistema se encontraba con una condición particular que le constreñía (eventos críticos). Una vez detectados estos cuellos de botella se resolvían mediante un proceso de optimización parando la simulación y reanudándola cuando el evento crítico era resuelto. La solución adoptada es el *input* que debe implementarse en el diseño de la terminal (puede incluir incrementar el número o eficiencia de elementos de manipulación de contenedores, diseño físico de la terminal, etc.). Más tarde Barros *et al.* (2011) vuelven a utilizar este algoritmo en su simulación resolviendo el BAP en un puerto sometido a restricciones por mareas y niveles de stocks en las explanadas¹⁶⁵.

Los algoritmos del tipo A-BEES ("*adaptive balanced explorative and exploitative search*") fueron también aplicados por primera vez en puertos por Legato *et al.* (2008). Dichos algoritmos presentan un procedimiento de búsqueda aleatoria alternativo a los anteriores mediante un

¹⁶³ Conforme Wikipedia RNE (2015) "*en análisis numérico un algoritmo de búsqueda de raíces [“Root-finding algorithm”] es un método numérico o algorítmico para encontrar las soluciones aproximadas de una ecuación dada por la expresión $f(x) = 0$ para una función matemática f dada. A la solución x de la ecuación se le llama raíz o cero de la función*".

¹⁶⁴ Este método fue descrito de manera independiente por Scott Kirkpatrick, C. Daniel Gelatt y Mario P. Vecchi en Kirkpatrick *et al.* (1983), y por Vlado Černý en Černý (1985) y es una adaptación del algoritmo *Metropolis-Hastings*, (subvariante del método de Montecarlo utilizado para generar muestras de estados de un sistema termodinámico).

¹⁶⁵ Denominan a este problema BAPTBS ("*Berth Allocation Problem in Tidal Bulk ports with Stock level conditions*").

procedimiento en dos fases: la exploración (“*exploration*”) y la explotación (“*exploitation*”). Así la primera tiene que ver con la búsqueda general de posibles soluciones en todo el entorno de simulación mientras que la segunda representa la búsqueda local de soluciones en diferentes subregiones del modelo.

Más información sobre los algoritmos A-BEES puede encontrarse en Prudius y Andradóttir (2004) y en la propia tesis doctoral de Prudius (2007).

Viera *et al.* (2012) estudian el BAP en terminales de graneles incluyendo como elemento relevante los diferentes estados operativos impuestos por el régimen de mareas, aspecto que suele ser condicionante en un buen número de terminales de este tipo. Establecen una regla de prioridad en la asignación de atraque basado no sólo en las mareas sino en el nivel de stocks de cada producto, algo consistente con la logística habitual de terminales de este tipo asociados a procesos industriales o productivos concretos donde el consumo (o producción) de cierto material se materializa de manera continua (lo que hace aumentar o incrementar también de una manera pseudocontinua el material almacenado). En un segundo plano de prioridad dejan la optimización del grado global de utilización del muelle, demoras, tiempo total de servicio en un horizonte de planificación determinado, etc. El algoritmo que utilizan estos autores es un heurístico tipo greedy (“*greedy heuristic*”) que se puede englobar dentro la familia GRASP (“*greedy randomized adaptive search procedures*”) y algunos autores traducen como algoritmos de “búsqueda voraz”, “búsqueda ávida” o “búsqueda devoradora”.

Un algoritmo voraz es, como en los casos anteriores, un procedimiento que trata de encontrar localmente la opción óptima en cada estado con la esperanza de alcanzar con ello el óptimo global del modelo. Este procedimiento también ha sido históricamente usado para encontrar la solución del “*hombre viajero*” y por ello es indicado para encarar una buena parte de problemas portuarios en los que la minimización de la distancia es un elemento clave (por ejemplo, la optimización de almacenamientos en superficies o la gestión óptima del almacenamiento de contenedores desde una perspectiva 3D).

Este algoritmo utiliza una lógica de proceso que se basa en que, en cada estado, el viajero visita y a su vez no visita la ciudad más cercana a la que en ese momento se encuentra y computa los tiempos que tarda en cada uno de los escenarios. Este sistema, aun cuando analiza un elevado número de opciones (millones), suele encontrar óptimos locales en un tiempo razonable de computación.

Una actualización de los algoritmos tipo *greedy* o voraz se puede encontrar en Resende y Ribeiro (2003) o, más recientemente, en el capítulo 16 de Cormen *et al.* (2009) si bien estos autores ya

los habían tratado a principios de los 90 en Cormen *et al.* (1990) y tienen sus antecedentes en los estudios de Kruskal (1956), Prim (1957) y Dijkstra (1959), todos ellos desarrolladores de variantes de algoritmos tipo greedy conocidos como algoritmo de Kruskal, algoritmo de Prim y algoritmo de Dijkstra o de caminos mínimos; y que se basan en una estructura de datos por grafos.

En lo que se refiere a la utilización de algoritmos GRASP en entornos portuarios, hay que hacer referencia a Cao *et al.* (2008) que estudian, específicamente, el problema de almacenamiento y carga de contenedores con una grúa de parque y que es una subvariante portuaria del “*container loading problem*” y del aún más genérico “*packing problem*”; problema en el que este algoritmo ha sido bastante utilizado tal y como se recopila en la revisión bibliográfica realizada por Parreño *et al.* (2007) citando estudios en esta línea como Delorme *et al.* (2003), Mack *et al.* (2004) y Moura y Oliveira (2005) o en unas investigaciones relacionadas con matrices de descomposición de tráfico incluidos en Prais y Ribeiro (2000).

Shire (2015), seguramente, ha sido el primer autor en introducir en el ámbito portuario los algoritmos de modelización aplicada tipo “AMA” (de *applied modelling algorithms*) en el contexto de la resolución de los problemas de asignación de atraque (BAP) y planificación de llegada de buques (*vessel call planning*).

Peterkofsky y Daganzo (1990) habían utilizado un algoritmo *branch-and-bound*¹⁶⁶ para abordar la resolución del QCSP, algoritmo que también es utilizado por Narasimhan y Palekar (2002) en el análisis del que denominan *transtainer routing problem*.

Ng y Mak (2005a) exportan los algoritmos *branch-and-cut*¹⁶⁷ en la resolución de un problema del tipo YCSP. Moccia *et al.* (2006) también utilizan algoritmos de tipo *branch-and-cut* para analizar el problema QCSP presentando en su artículo una detallada descripción matemática del mismo. Estos últimos trabajos habían sido presentados por el mismo equipo en ocasión de una conferencia en Cordeau *et al.* (2005b).

Recientemente, ha surgido una nueva línea de investigación que es necesario destacar en esta tesis doctoral. Se trata del artículo de Rustell (2014) que reúne tres condiciones que son especialmente relevantes para esta investigación:

- 1) Se trata del primer *trabajo* en el que un autor utiliza la modelización (en el sentido en que se está abordando en este trabajo) para introducirla en un *diseño de un dique* portuario. Nuestra

¹⁶⁶ Algoritmo tratado en Land y Doig (1960).

¹⁶⁷ Algoritmo refereciado en Padberg y Rinaldi (1991).

condición de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; hace que esta aplicación nos resulta particularmente atractiva.

- 2) El autor se ha formado en *HR Wallingford* (Oxon, UK) institución en la que este autor pasó su primera estancia en el extranjero dentro del marco de ayudas a becarios predoctorales del programa FPI (formación de personal de investigación) del Ministerio de Educación de España y que marcó positivamente su interés por la investigación hace ya 20 años.
- 3) Se centra en resolver un problema en el contexto del *tráfico de GNL*, mercado que desde hace años es prioritario para el investigador, pues al margen de sus trabajos de investigación en ingeniería y gestión portuaria trabaja desde el año 2008 como Director de Aprovisionamiento y Transporte Marítimo de la compañía gasística Union Fenosa Gas S.A.

Con ello, y abandonando esta licencia, se puede destacar como Rustell (2014) analiza con un algoritmo Brent¹⁶⁸ (Brent, 1973) la disponibilidad de atraque en función de la disposición en planta del dique resolviendo el proceso mediante una aproximación iterativa. Un modelo aleatorio de transformación de oleaje es usado para generar el oleaje incidente en el dique, elemento clave para el dimensionamiento de un rompeolas.

Como resumen de todo lo indicado en este apartado, en la tabla 9 se resumen las referencias bibliográficas analizadas y compiladas en este trabajo bajo el criterio del algoritmo de cálculo utilizado.

De la misma cabe destacar que si bien la primera técnica en utilizarse fue probablemente el método de Montecarlo (Park, 1987), las más utilizadas en estos momentos son los algoritmos genéticos y los algoritmos tabú muy asentados en entornos portuarios, surgiendo en esta industria a finales de la década de los 90 pero desarrollándose, verdaderamente, durante la primera década del 2000.

A partir del año 2000 algunos autores empiezan a exportar otros métodos a la simulación portuaria, si bien hasta la fecha se trata de experiencias prácticamente singulares (casos aislados) que corresponden seguramente más a un interés científico o académico inicial en testar la aplicación de estos métodos a puertos y terminales que a un interés práctico real de explotarlos masivamente en estos ambientes. Dentro de estas “nuevas tendencias” se encontrarían: algoritmos de recocido simulado (“*simulated annealing*”), A-BEES (“*adaptive balanced explorative and*

¹⁶⁸ Este algoritmo es presentado en Brent (1973) y posteriormente tratado en Forsythe *et al.* (1977) o Press *et al.* (1992), este último donde se presentaba una variante que hoy se conoce como Método Dekker-Brent. Este método es una variante de lo que se conocen como *root-finding algorithm* en el que se combinan métodos de bisección, métodos secantes y métodos de interpolación cuadrática inversa.

exploitative search”), heurístico tipo greedy, técnicas de modelización aplicada (“AMA” de *applied modelling algorithms*), algoritmos “*branch-and-cut*” y *branch-and-bound*” o algoritmos tipo Brent.

Tabla 9. Algoritmos de resolución de problemas utilizados en técnicas de simulación en ambientes portuarios.

Algoritmo	Autor
Método Montecarlo	<ul style="list-style-type: none"> ○ Park (1987). ○ Cyr (1992). ○ Bugaric y Petrovic (2007). ○ Saranen y Hilmola (2010). ○ Alali y Al-Bazi (2013).
Algoritmos de búsqueda tabú	<ul style="list-style-type: none"> ○ Botempi <i>et al.</i> (1997). ○ Gambardella <i>et al.</i> (1998). ○ Bortfeldt y Gehring (1998). ○ Lim <i>et al.</i> (2002a). ○ Bortfeldt <i>et al.</i> (2003). ○ Gehring <i>et al.</i> (2003). ○ Fagerholt (2004a). ○ Fagerholt (2004b). ○ Cordeau <i>et al.</i> (2005a). ○ Chen <i>et al.</i> (2007). ○ Fagerholt y Lindstad (2007). ○ Sammarra <i>et al.</i> (2007). ○ Mak y Sun (2009). ○ Wong y Kozan (2010). ○ Korsvik y Fagerholt (2010). ○ Korsvik <i>et al.</i> (2010). ○ Fagerholt <i>et al.</i> (2011). ○ Øvstebøa <i>et al.</i> (2011a). ○ Øvstebøa <i>et al.</i> (2011b). ○ Arango <i>et al.</i> (2012a). ○ Arango <i>et al.</i> (2012b). ○ Lalla-Ruiz <i>et al.</i> (2012).

Algoritmo	Autor
Algoritmos genéticos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Botempi <i>et al.</i> (1997). ○ Gehring y Bortfeldt (1997). ○ Gambardella <i>et al.</i> (1998). ○ Bruzzone y Signorile (1998). ○ Nishimura <i>et al.</i> (2001). ○ Bortfeldt y Gehring (2001). ○ Gehring y Bortfeldt (2002). ○ Dubrovsky <i>et al.</i> (2002). ○ Roach y Wilson (2002). ○ Dahal <i>et al.</i> (2003). ○ Fagerholt (2004a). ○ Dahal <i>et al.</i> (2005). ○ Ng y Tsang (2005). ○ Yue <i>et al.</i> (2006). ○ Ng <i>et al.</i> (2007). ○ Zhou y Kang (2008). ○ Mak y Sun (2009). ○ Hen <i>et al.</i> (2010). ○ Ayachi <i>et al.</i> (2010). ○ Arango <i>et al.</i> (2010). ○ Javanshir y Seyedalizadeh (2010). ○ Korsvik y Fagerholt (2010). ○ Chung y Choy (2012). ○ Kaveshgar <i>et al.</i> (2012). ○ Ma <i>et al.</i> (2012). ○ Moussi <i>et al.</i> (2012a). ○ Moussi <i>et al.</i> (2012b). ○ Chung y Chan (2013). ○ Wang <i>et al.</i> (2013b). ○ Zhang <i>et al.</i> (2013). ○ Peng <i>et al.</i> (2015).
Algoritmos de programación dinámica	<ul style="list-style-type: none"> ○ Botempi <i>et al.</i> (1997). ○ Gambardella <i>et al.</i> (1998). ○ Jin <i>et al.</i> (1999). ○ Ainouche y Smati (2002). ○ Jin y Gao (2006). ○ Lam <i>et al.</i> (2007). ○ Önüt y Saglam (2008). ○ Alarcon Hernandez <i>et al.</i> (2012).
Algoritmos de recocido (o enfriamiento) simulado (“ <i>simulated annealing</i> ”)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Legato <i>et al.</i> (2008). ○ Barros <i>et al.</i> (2011).
ABEES (“ <i>adaptive balanced explorative and exploitative search</i> ”)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Legato <i>et al.</i> (2008).
Heurístico tipo greedy o “veroz”(“ <i>greedy heuristic</i> ”)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Viera <i>et al.</i> (2012).

Algoritmo	Autor
Modelización aplicada (“AMA” de <i>applied modelling algorithms</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Shire (2015).
Algoritmos “ <i>branch-and-bound</i> ”	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peterkofsky y Daganzo (1990). ○ Kao <i>et al.</i> (1993). ○ Hsu y Chen (1997). ○ Liu y Schereli (2000). ○ Narasimhan y Palekar (2002).
Algoritmos “ <i>branch-and-cut</i> ”	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ng y Mak (2005a). ○ Ng y Mak (2005b). ○ Cordeau <i>et al.</i> (2005b). ○ Moccia <i>et al.</i> (2006).
Algoritmos tipo Brent	<ul style="list-style-type: none"> ○ Rustell (2014).

Fuente: Elaboración propia

2.4.4 Utilización de software comercial de propósito general en ambientes portuarios.

2.4.4.1 Introducción.

La simulación puede abordarse a través de lenguajes de programación o simulación; pero hoy en día se dispone de simuladores muy potentes que permiten programar escenarios de simulación y testarlos sin tener unos conocimientos de programación elevados.

Para ello, los simuladores cuentan con bibliotecas de edición gráfica y herramientas/algoritmos preestablecidos que son comunes en los procesos de simulación y que por tanto permiten customizar casi cualquier situación portuaria con su correspondiente modelo “*ad hoc*”.

Estos simuladores pueden a su vez utilizar como paradigmas tanto los sistemas “DES”, como los “ABS” o los “SD” que ya han sido tratados en el apartado 2.2.5. y serán objeto de un capítulo completo más adelante (capítulo 3).

De igual modo en algún caso cuentan con extensiones específicas para su utilización en puertos (estos simuladores de propósito especial para puertos son analizados en el apartado 2.3.6) lo que hace aún si quiera más fácil la confección del modelo portuario, teniendo como mayor inconveniente el precio de dicho software.

En el siguiente epígrafe se realiza una revisión bibliográfica del tipo de simuladores que han utilizado diferentes autores (indistintamente de que sean simuladores de propósito general o sus extensiones de propósito especial allá donde las haya).

2.4.4.2 Aplicaciones prácticas de utilización de software comercial de propósito general en ambientes portuarios.

Actualmente, el software de simulación más extendido en el mundo según las referencias bibliográficas que se han consultado es **ARENA®** con licencia de *Rockwell Automation*.

Efectivamente, son muchas las aplicaciones que han apoyado sus estudios en la modelización mediante dicho software, si bien en el ámbito portuario son todavía discretas (al menos desde el punto de vista de su difusión científica) a pesar de que es un software relativamente potente, de coste ajustado y con licencias de investigación y educacionales que, además, cuenta con extensiones específicas para diseño portuario; lo que hace prever una mayor utilización en el futuro.

Los pioneros en exportar este software a entornos portuarios han sido Tahar y Hussain (2000) que publicaron los primeros resultados utilizando este modelo en la terminal de contenedores de Kelang¹⁶⁹ (Kelang, Malasia).

Cortés *et al.* (2007) en sus estudios de optimización del puerto de Sevilla (España), Kulak *et al.* (2008) quienes estudiaron las terminales de contenedores de Haydarpasa (Estambul, Turquía), Dragović *et al.* (2009b) y Park *et al.* (2012b) en aplicaciones prácticas en diversas terminales de Corea; son otros autores que utilizan este software comercial.

En combinación y/o comparación entre ARENA y SLX existe un importante grupo de referencias bibliográficas entre las que cabe citar a Merkuryev *et al.* (1998 y 2000), Tahar y Hussain (2000); Lee *et al.* (2003), Kozan (2006), Park *et al.* (2006b y 2007), Park y Dragović (2008) y Dragović *et al.* (2009a). Todos ellos en el marco de estudio de diferentes terminales de contenedores.

De igual modo abundantes son los investigadores que han realizado trabajos similares con la ayuda de **WITNESS®**, entre las referencias más destacadas cabe citar a Shabayek y Yeung (2002) en su análisis de la terminal Kwai Ching de contenedores en Hong Kong, seguidos por Stchedroff y Cheng (2003) que analizan la cadena logística del GNL integrando tanto el puerto de carga como el descarga, Marin *et al.* (2004) también enmarcados en una terminal de

¹⁶⁹ En determinadas referencias este puerto y ciudad se denominan Klang en vez de Kelang.

contenedores (si bien en este caso se trata de la terminal ferroviaria de Port-Bou en la frontera franco-española y no específicamente un entorno portuario); García *et al.* (2006) en este caso estudiando un puerto seco y Alarcón *et al.* (2012) que centran sus investigaciones en las optimizaciones de fuel en la industria marítima.

Los primeros en exportar el software **AWESIM**® a entornos portuarios han sido Nam *et al.* (2002) en sus estudios sobre terminales de contenedores y Demirci (2003) en sus estudios sobre el puerto de Trabzon (Turquía)¹⁷⁰ en el cual estudió las operaciones portuarias y las inversiones necesarias en equipamiento (grúas y medios de manipulación) para eliminar los cuellos de botella y aumentar la productividad; dentro del marco general de análisis y optimización de inversiones. Köse *et al.* (2003) analizan con esta herramienta el tráfico marítimo en el estrecho de Estambul (Turquía). Otros autores que utilizan este software son Ng y Wong (2006) investigando terminales de contenedores, Segovia (2009) en el contexto de almacenamiento y despacho de gas natural y, finalmente, Uğurlu *et al.* (2014) en un interesante estudio utilizan AWESIM para determinar la capacidad del puerto y tamaño de las colas en los barcos arribando a la terminal de graneles líquidos¹⁷¹ de la empresa BOTAS¹⁷² en el puerto de Ceyhan (Turquía). Para ello generan una serie de escenarios y alternativas en cuanto a intervalos de llegada de buques, disponibilidad de servicios portuarios, tiempos de maniobra y operación, tamaño de buques, etc. Analizando en cada uno de ellos los umbrales de capacidad y los cuellos de botella no tan sólo en la propia terminal portuaria sino en la propia gestión del oleoducto de llegada a la misma.

Otro importante software de simulación es el **Taylor II** relativamente extendido y que ha sido utilizado por Kia *et al.* (2002) en sus estudios de rendimiento y capacidad portuaria en terminal de contenedores y en los que se aplicaban tanto técnicas estadísticas clásicas como este software de simulación para comparar resultados. Kiani *et al.* (2010), en su investigación de optimización de medios terrestres y reducción de la congestión en terminales marítimas, también utilizan este software de simulación.

El equipo de investigación operativa del *Dalle Molle Institute for Artificial Intelligence Research*, institución de investigación afiliada a la Universidad de Lugano (Suiza) en una colección de artículos de finales de los 90 y principios de los 2000 dedicados a terminales intermodales y optimización de los modos de transporte ferroviario y por carretera en las mismas, utiliza el software de simulación **MODSIM-III**. Entre las investigaciones más significativas cabe citar a

¹⁷⁰ El puerto de Trabzon (Turquía) es el mayor puerto en el Este del Mar Negro con movimientos anuales en el entorno de 3 millones de Toneladas. Cuenta con cuatro muelles con longitud aproximada de 1.500 metros en los que llegan a atracar a máxima capacidad entre 10 y 15 barcos (dependiendo de las hectáreas) y unas 30 Hectáreas de área de depósito (donde se llegan a depositar hasta 500.000 Toneladas. Los Autores modelizan la totalidad del puerto.

¹⁷¹ Punto final y terminal marítimo de carga del oleoducto Irak –Turquía.

¹⁷² Empresa nacional turca del sector oil & gas.

Gambardella *et al.* (1998), Gambardella *et al.* (2001) y Rizzoli *et al.* (2002). De igual modo Drucker y Campbell (2015) utilizan este lenguaje de simulación para estudiar las capacidades operativas de los almacenes de un astillero. Este software (en su versión MODSIM-II) es también utilizado por Nevins *et al.* (1998b) para realizar una modelización portuaria con fines militares.

El software de simulación para entornos portuarios, **FLEXSIM**® o su variedad específicamente diseñada para terminales de contenedores (**FLEXSIM TC** ©) ha sido utilizado a partir de la presente década por importantes investigadores como Burnett *et al.* (2008) en su estudio de automatización de procesos en astilleros, Liu y Dong (2008) en sus estudios de terminales de contenedores, Tsai *et al.* (2010) para evaluar la productividad en la terminal de contenedores del puerto de Savannah (Georgia, USA), Béchar y Côté (2013) en su simulación de una terminal de mineral de hierro con el objetivo de reducir sus cuellos de botella y Abd El-Nasser *et al.* (2013a y 2014b) en su estudio de optimización de la terminal de contenedores del puerto de Alejandría (Egipto).

Otros ejemplos con software de simulación **SIMPLE++** son Yun y Choi (1999) quienes utilizan un desarrollo basado en el lenguaje de programación orientado a objetos C++, aplicado en su caso a una terminal de contenedores. Escogen como escenario experimental el puerto de Busan (Corea del Sur) y calculan una serie de indicadores de rendimiento de la terminal y su equipamiento incluyendo las tasas de utilización de grúas y ratio de ocupación del patio.

Como otros ejemplos más aislados se encuentran Li y Li (2010) que desarrollan su modelo de una terminal contenedores sobre **AnyLogic 6.5.0** © (software de simulación desarrollado sobre lenguaje Java y utilizando el marco proporcionado por Eclipse¹⁷³).

Kondratowicz (1990 y 1992) publica investigaciones sobre incremento de la eficiencia en puertos mediante la utilización del software de modelización desarrollado a tal efecto que denominará **TRANSNODE**.

Se encuentran también autores que han utilizado **SIMIO**® en la modelización portuaria, citando como ejemplo Liu y Takakuwa (2011) en sus estudios enfocados, una vez más, a terminales de contenedores. Dicho simulador cuenta con dos ventajas actuales, primero que está desarrollado

¹⁷³ Anylogic es un lenguaje de simulación que tiene sus orígenes en los años 90 donde el grupo de investigación Distributed Computer Network (DCN) de la Universidad Técnica de San Petersburgo (Rusia) desarrolla un lenguaje de simulación denominado COVERS. El éxito académico de este lenguaje (desarrollado bajo una beca de la empresa Hewlett Packard.), llevo al DCN a montar una estructura de comercialización empresarial más profesional y en 1998 crean AnyLogic Company lanzando en el año 2000 la primera versión de AnyLogic que nació en versión 4 (pues era en realidad heredera de Covers 3). A la fecha de redacción de esta tesis se encuentra en versión 8.1 (lanzada en junio de 2017). Esta última versión es una plataforma de software cruzada (o multi-plataforma) que trabaja tanto con Windows como con Mac OS o Linux. Más información en ANYLOGIC (2016).

bajo el paradigma ABS (que parece ganar adeptos día a día) y que cuenta con una extensión específica recientemente realizada para puertos; por lo que todo parece indicar que se podrá ver en un futuro mayor número de artículos que referencian este simulador como la herramienta aplicada.

Como se ha comentado, otros muchos autores han preferido sobrepasar las barreras que imponen los paquetes comerciales o los propios lenguajes de simulación y han construido modelos directamente desde lenguajes de programación de propósito general.

Así, Choi y Yun (2000) y Choi y Ha (2004) estudian una terminal de contenedores usando una simulación mediante una programación orientada a objetos desarrollado bajo Visual C++, al igual que Bielli *et al.* (2006) quienes utilizan Java.

Como resumen de todo lo comentado en este epígrafe, en la tabla 10 se recoge una recopilación de las referencias bibliográficas más relevantes citando lenguaje o simulador utilizado y autor/es. Para la construcción de dicha tabla se usará como base un trabajo de recopilación incluido en Dragović *et al.* (2016) que hace evolucionar desde unos trabajos previos compilados en Dragović *et al.* (2010), Park y Dragović (2009) y Dragović *et al.* (2006b). Siguiendo este esquema se ha ampliado la tabla en esta tesis con otras referencias no citadas por dichos autores.

Tabla 10. Aplicaciones prácticas de simulación portuaria. Autores y paquetes de simulación utilizados.

Lenguajes / Simuladores Utilizados	Autores
AnyLogic ©	Li y Li (2010).
ARENA ©	Tahar y Hussain (2000). Cortés <i>et al.</i> (2007). Kulak <i>et al.</i> (2008). Park <i>et al.</i> (2012b). Dragović <i>et al.</i> (2009b).
AUTOMOD ©	Lee y Cho (2007).
AweSim ©	Nam <i>et al.</i> (2002). Demirci (2003). Köse <i>et al.</i> (2003). Ng y Wong (2006). Segovia (2009). Uğurlu <i>et al.</i> (2014).
C	Hayuth <i>et al.</i> (1994).
Comparación ARENA © y SLX	Merkuryev <i>et al.</i> (1998). Merkuryeva <i>et al.</i> (2000). Tahar y Hussain (2000). Lee <i>et al.</i> (2003). Park <i>et al.</i> (2006b). Kozan (2006). Park <i>et al.</i> (2007). Park y Dragović (2008). Dragović <i>et al.</i> (2009a).
Enterprise Dynamics (ED) ©	Van Asperen <i>et al.</i> (2003).
Extend Version3.2.2	Sgouridis y Angelides (2002). Sgouridis <i>et al.</i> (2003).
FLEXSIM y FLEXSIM TC ©	Burnett <i>et al.</i> (2008). Lui y Dong (2008). Tsai <i>et al.</i> (2010). Bécharde Côté (2013). Abd El-Nasser <i>et al.</i> (2014a). Abd El-Nasser <i>et al.</i> (2014b).
GPSS/H	Pachakis y Kiremidjian (2003). Dragović <i>et al.</i> (2005a). Dragović <i>et al.</i> (2006a). Dragović <i>et al.</i> (2006a). Dragović <i>et al.</i> (2006b). Xingyan <i>et al.</i> (2009a). Xingyan <i>et al.</i> (2009b). Dragović <i>et al.</i> (2010).

Lenguajes / Simuladores Utilizados	Autores
iThink©	Madachy <i>et al.</i> (2008).
MATLAB	Javanshir y Seyedalizadeh (2010).
MODSIM ©	Koh <i>et al.</i> (1994a). Ramani (1996). Gambardella <i>et al.</i> (1998). Rizzola <i>et al.</i> (1999a). Nevins <i>et al.</i> (1998b). Gambardella <i>et al.</i> (2001). Rizzoli <i>et al.</i> (2002). Howard <i>et al.</i> (2004). Henesey <i>et al.</i> (2007). Drucker y Campbell (2015).
ORP. Java	Bielli <i>et al.</i> (2006).
Java	Rida (2014).
Otros modelos de simulación de eventos discretos o time-discrete	Dahal <i>et al.</i> (2003). Canonaco <i>et al.</i> (2.008). Petering (2.009). Petering y Murty (2009). Petering <i>et al.</i> (2009).
Otros modelos time-discrete	Zhang <i>et al.</i> (2011).
Pascal	El Sheik <i>et al.</i> (1987). Bugaric y Petrovic (2007).
Plant Simulation	Ha <i>et al.</i> (2007).
PORTSIM (Argonne National Laboratory)	Nevins <i>et al.</i> (1995). Nevins <i>et al.</i> (1998a).
PORTSIM (UNCTAD)	Comer y Taborga (1987). Teo (1993).
PortSIM (Oak Ridge National Laboratory) (programado sobre lenguaje de programación Python)	Koch (2007).
PowerSIM	Briano <i>et al.</i> (2008). Revetria <i>et al.</i> (2008). Briano <i>et al.</i> (2009). Carlucci y Cira (2009). Dundovic <i>et al.</i> (2009). Caballini <i>et al.</i> (2012). Guzzi <i>et al.</i> (2013).
Professional DYNAMO	Munitic <i>et al.</i> (1990). Dvornik <i>et al.</i> (2006). Munitic <i>et al.</i> (2007).
Scenario generator	Hartmann (2004).
SIMIO ©	Liu y Takakuwa (2011).

Lenguajes / Simuladores Utilizados	Autores
SIMPLE++ / Programación Orientada a objetos C++	Yun y Choi (1999).
SIMPORT	Henesey (2004b). Henesey (2006b).
Taylor II	Kia <i>et al.</i> (2002). Kiani <i>et al.</i> (2010).
Transnode	Kondratowicz (1990). Kondratowicz (1992).
VENSIM ©	Engelen <i>et al.</i> (2006). Luan <i>et al.</i> (2010).
Visual BASIC	Yang <i>et al.</i> (2004).
Visual C++	Choi y Yun (2000). Choi y Ha (2004).
Visual SLAM	Legato y Mazza (2001).
Witness ©	Shabayek y Yeung (2002). Stchedroff y Cheng (2003). Marín <i>et al.</i> (2004). Parola y Sciomachen (2005). García <i>et al.</i> (2006). Alarcón <i>et al.</i> (2012).

Fuente: Elaboración propia partiendo de Dragović *et al.* (2006a, 2010 y 2016) y Park y Dragović (2009).

2.5 Comparación de resultados: formulaciones analíticas *versus* modelos de simulación.

Uno de los aspectos que sería muy interesante analizar y del que se han encontrado escasos experimentos concretos y menos referencias bibliográficas de valor, es el de comparación de los modelos analíticos tradicionales (aquellos que se describen en el anejo 1 de esta tesis) con los resultados obtenidos en el mismo ejemplo de aplicar un modelo de simulación computacional.

Sin perjuicio de lo anterior, algunos autores han realizado comparaciones parciales y bajo una base experimental concreta, entre los resultados obtenidos por aplicación directa de los procedimientos analíticos de teoría de colas y los resultados obtenidos mediante modelos de simulación.

Dragović *et al.* (2006a) aplican a la terminal de contenedores *Busan East Container Terminal* (Busan, Corea del Sur) tanto un modelo de simulación construido con GPSS/H como un

procedimiento de optimización analítico mediante teoría de colas para evaluar el rendimiento conjunto del sistema buque- muelle. Para ello miden en ambas aproximaciones parámetros clásicos como el grado de utilización del muelle, el número medio de buques en espera, el tiempo medio de espera de buques en cola, el tiempo medio de servicio del buque en puerto, la productividad media de la grúa de muelles y el número medio de grúas por barco. Estos autores tras calibrar el modelo construido con GPSS/H con datos reales de operación concluyen que los resultados que se obtienen con los procedimientos analíticos (consideran una distribución $M/E_k/n$) son consistentes con los obtenidos por el propio modelo de simulación en diferentes escenarios, validando indirectamente con ella esta formulación teórica analítica proporcionada por los clásicos modelos de teoría de colas que proponen aplicar en futuros ejercicios de optimización (sin necesidad de realizar los más costosos procedimientos de simulación).

Autores de esta misma escuela amplían los estudios anteriores en Dragović *et al.* (2010) y sobre el mismo escenario experimental (*Busan East Container Terminal*) aplican nuevamente un modelo de simulación y un procedimiento analítico con teoría de colas. Esta vez no sólo modelizan la interacción muelle-buque, sino que incluyen en sus estudios la zona de depósito, resolviendo un problema que denominan “*anchorage-ship-berth-yard link*” (ASBYL) en contraposición al problema *ship-berth- link* (SBL) que definían en la referencia Dragović *et al.* (2006a).

El esquema que siguen es muy parecido al anterior construyendo un modelo con GPSS/H y otro mediante un procedimiento analítico. Para el ajuste analítico toman los datos reales de llegada entre buques, determinando que el mejor ajuste para este parámetro se obtiene con una distribución markoviana o aleatoria (incluso aunque la llegada de buques está sujeta a programación); mientras que para el tiempo medio de servicio de buques obtienen diferentes ajustes en función de los años y tipo de buques (dividen en tres clases de buques), pero concluyen que la distribución es una función Erlang de orden K (donde la fase K varía entre 2 y 6 en función del año y tipo de buque). Con ello adoptan un modelo analítico del tipo $M/E_k/n$ acudiendo a notación Kendal.

Para ambos modelos (simulación y analítico) calculan y obtienen los tiempos medios de servicio y de espera; que compararán con los datos reales que obtienen directamente de la terminal para dos años en concreto 2005 y 2006.

En general concluyen que los datos obtenidos por ambos procedimientos proporcionan una buena aproximación a la realidad, siendo más precisos (mejor ajuste), en general, los que ofrece el modelo de simulación; si bien ambos (simulación y procedimiento analítico) proporcionan tiempos medios de servicio de buques ligeramente mayores que los datos de operación reales.

Al tiempo concluyen en base al experimento realizado que los datos de tiempo medio de servicio de los ejercicios de simulación son siempre menores que los resultados analíticos si bien las diferencias son muy pequeñas (diferencias en todos los casos inferiores al 2.5%).

A la misma conclusión cualitativa llegan al analizar los tiempos medios de espera, es decir, los resultados de modelos computacionales reportan menores tiempos de espera, sin embargo desde el punto de vista cualitativo las diferencias son mayores ya que en el mejor de los casos (modelo analítico AM-II) las diferencias oscilan entre el 9% (análisis del año 2005 en “*all classes*” en ilustración 38) y el 29% (análisis del año 2005 en “*I class*” en ilustración 38).

Ilustración 38. Comparación de resultados entre modelo de simulación y teoría de colas (procedimiento analítico).

Table 2. Average service time of ships

Results	Average service time of ships in hours							
	(All classes)		(I class)		(II class)		(III class)	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006
Real data	14.07	12.60	8.71	7.85	13.47	12.52	20.05	17.48
Simulation results	14.35	12.88	8.87	8.15	13.91	12.71	20.29	17.80
Analytical results	14.51	12.95	9.06	8.17	13.67	12.91	20.78	17.75

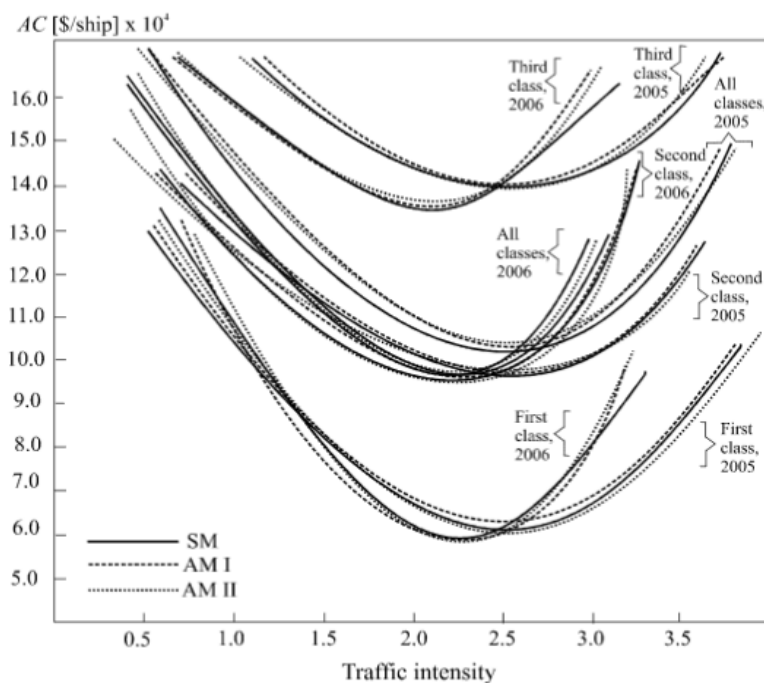
Table 3. Average waiting time of ships

Results	Average waiting time of ships in hours							
	(All classes)		(I class)		(II class)		(III class)	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006
Simulation results	2.42	1.15	2.45	1.29	2.43	1.15	2.39	1.01
Analytical results, AM I	3.19	1.85	3.25	1.21	3.24	2.14	3.07	2.21
Analytical results, AM II	2.63	1.29	3.15	1.41	2.71	1.32	2.04	1.15

Fuente: Ejemplo práctico proporcionado en Dragović et al. (2010).

Estos autores van más allá e incluso aplican funciones de costes calculando el coste medio del barco (“AC”) para distintas intensidades de tráfico, proporcionando la ilustración 39.

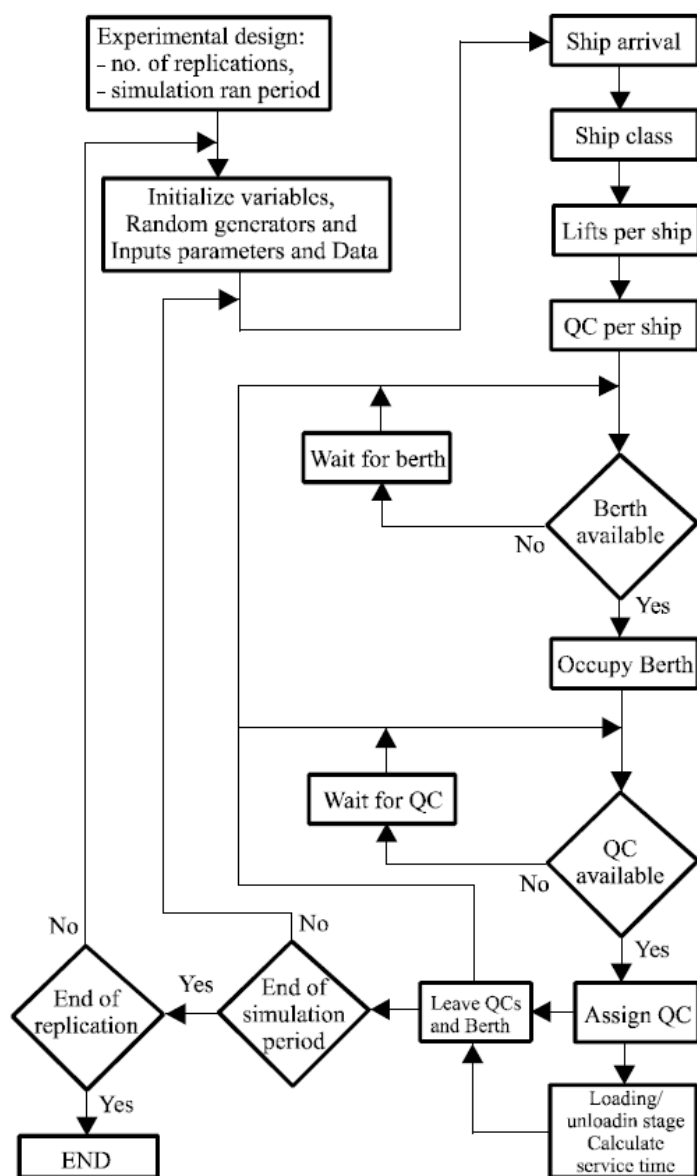
Ilustración 39. Coste de buque versus intensidad de tráfico. Aplicación práctica de funciones de coste.



Fuente: Ejemplo práctico proporcionado en Dragović et al. (2010)

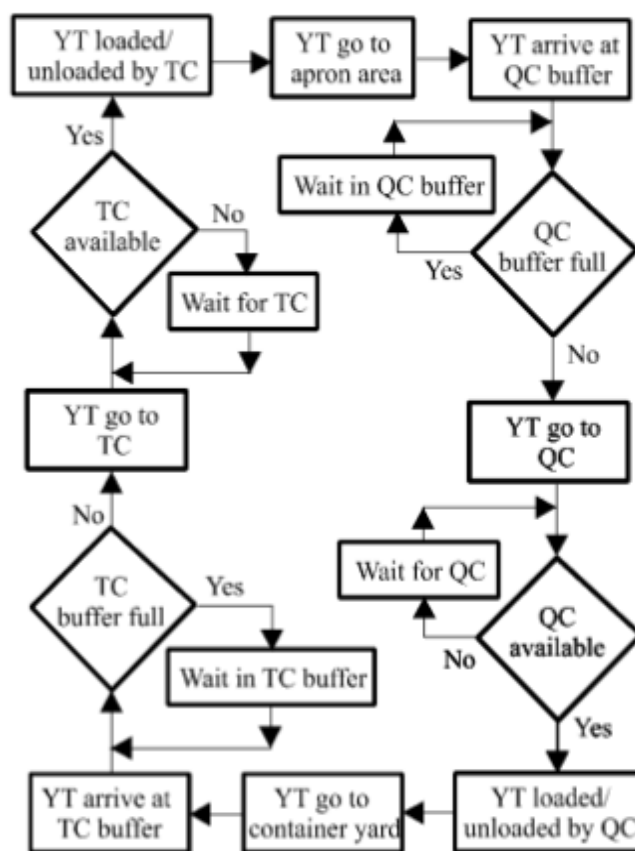
Dicho estudio resulta muy interesante tanto por la forma didáctica con la que se presente como por los detalles que dan del propio modelo de simulación, del cual ofrecen los propios flujogramas (algo no del todo habitual en estos trabajos de difusión científica). A continuación se muestra flujogramas de llegada y salida de buques (Ilustración 40) y el de operaciones terrestres en una terminal de contenedores (ilustración 41) extraído de Dragović *et al.* (2010).

Ilustración 40. Flujogramas de llegada y salida de buques.



Fuente: Dragović et al. (2010)

Ilustración 41. Flujograma de operaciones terrestres en una terminal de contenedores.



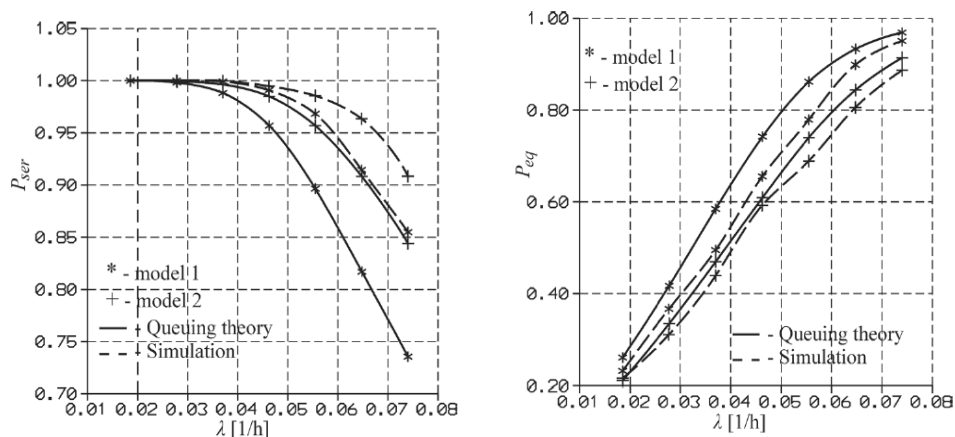
Fuente: Dragović et al. (2010)

Bugaric *et al.* (2011), también realizan la misma comparación para el caso concreto de una terminal fluvial de graneles sólidos. Para estos autores los procedimientos analíticos pueden ser usados en fases preliminares cuando se necesita menor precisión y mayor rapidez, debiendo usar el segundo método (modelos de simulación) en una fase posterior y de detalle cuando se necesita más precisión (fase de diseño).

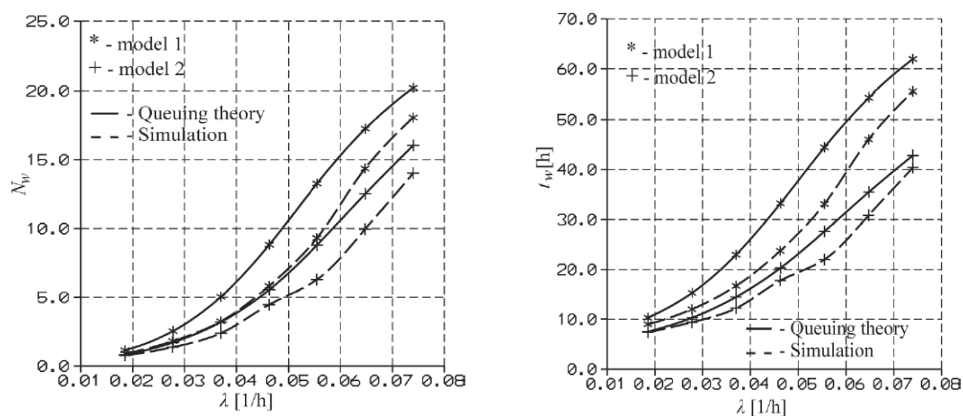
Estos autores proporcionan una comparación entre los resultados de simulación y de teoría de colas para dos modelos de funcionamiento diferenciados, presentado resultados y gráficos para variables como probabilidad de que un barco sea servido, probabilidad de permanecer en cola, número medio de barcos en fondeo, tiempo medio de los barcos en fondeadero, número medio y tiempo medio de los barcos en el sistema, etc.

En general, llegan a la conclusión de que la teoría de colas proporciona situaciones más pesimistas (mayores esperas) que los modelos de simulación, conclusión en la misma línea de resultados que Dragović *et al.* (2010). A continuación, en la ilustración 42 se comparan los resultados obtenidos por procedimientos analíticos clásicos de teoría de colas y ejercicio de simulación en algunas gráficas representativas de los resultados obtenidos por dichos modelos.

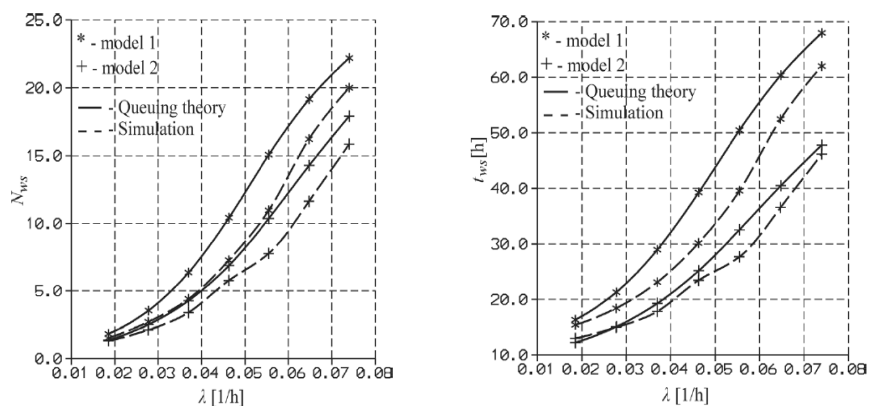
Ilustración 42. Comparación de resultados obtenidos por procedimientos analíticos clásicos de teoría de colas y ejercicio de simulación.



Probabilidad de que un barco sea servido (P_{ser}) y probabilidad de que permanezca en cola (P_{eq})



Número medio de barcos en fondeo (N_w) y tiempo medio que un buque pasa esperando en fondeo (t_w)



Numero medio del buque en el sistema (N_{ws}) y tiempo medio de estancia del buque en el sistema (t_{ws})

Fuente: Bugaric *et al.* (2011)

2.6 Conclusiones.

La simulación, tal y como hoy se reconoce, nació en el año 1958 con el profesor de investigación operativa de la Universidad de Southampton, Keith Douglas Tocher (1921–1981) con el desarrollo de su GSP (“*General Simulation Program*”).

Después de 60 años e impulsada por la computadora primero y el ordenador personal después es una herramienta esencial en muchas áreas de actividad, especialmente aquellos procesos industriales donde la investigación operativa encuentra un campo preferente de aplicación.

Su extrapolación al campo portuario ha sido, sin embargo, más lenta que en otros sectores.

Lo ha hecho desde el desarrollo de modelos de propósito especial, específicamente diseñados para la planificación operativa o diseño de instalaciones; siendo el primer modelo el desarrollado por la UNCTAD en el año 1969 (11 años después del primer modelo de Tocher), el segundo el desarrollado por el Banco Mundial (PORTSIM) en el año 1974 y el tercero el MIT Port Simulator fueron desarrollados (1987).

Desde entonces se ha visto como a finales del siglo XX los modelos de propósito especial pierden interés y se empiezan a desarrollar de una manera increíble diferentes estudios de modelización en entornos portuarios (fundamentalmente, pero no sólo, en el ámbito de los contenedores).

La realidad es que desde que PORTSIM o el MIT Port Simulator fueron desarrollados (1974 y 1987, respectivamente) estos modelos han evolucionado poco, y en cualquier caso tienen un campo de aplicación ciertamente limitado, configurándose como poco flexibles y no capaces de reproducir en detalle problemas excesivamente complejos como podría ser la modelización de todos los elementos de una terminal (grúas, barcos, elementos de manipulación, medios de transporte, ...).

Desde entonces, la modelización de entornos portuarios utilizando herramientas de propósito general (lenguajes de simulación, lenguajes de programación o simuladores) no ha dejado de crecer y hoy es un elemento esencial en la toma de decisiones operativas, tácticas y operacionales.

La cantidad, diversidad y complejidad de entornos que se puede simular es creciente y las restricciones de los modelos iniciales se han ido suprimiendo.

En el siglo XXI, tanto en el campo de la investigación operativa (estudio de operaciones y rendimientos de puertos y terminales) como en el campo práctico del diseño, planificación o evaluación de proyectos de inversión se han extendido la utilización de herramientas genéricas (no específicamente diseñadas para puertos pero capaces de reproducir estos sistemas de una manera más flexible) pero también han empezado a surgir nuevamente otras de propósito especial como extensiones o bibliotecas especiales de los programas matriz sobre el que se desarrollan.

Efectivamente, como ponen de manifiesto Park *et al.* (2012b) son muchos los lenguajes de programación, lenguajes de simulación y paquetes de simulación o simuladores que han sido utilizados en los últimos años en el campo portuario, citando específicamente estos autores al margen de PORTSIM: MODSIM II y III, PCModel, SIMPACK, SIMAN, SIMLIB, SIMPLE++, SLX, SLAM y Visual SLAM, ARENA, AweSim, Witness, Taylor II, GPSS/H, TermSim, Extend-version 3.2.2, HARAP, MUST, Anylogic, Matlab, FORTRAN, Pascal, Visual BASIC, C, C++, Java, etc..

Si bien existen algunas excepciones (sobre todo en la última década) esto ha sido así, especialmente, en el caso de las terminales de contenedores, donde existen una gran cantidad de agentes que intervienen en la operación susceptibles de ser modelados (barco, grúa de muelle, *stradle carriers*, tractores, *frontlifts*, camiones, ferrocarril,) y donde la productividad cobra quizá un role un poco más decisivo que en otro tipo de tráfico por la propia dinámica de la terminal donde la gestión de superficies y el orden de operación en la remoción de los contenedores requieren de un necesario proceso de optimización.

Sin embargo, una de las cosas que se ha podido constatar a lo largo de estos años de trabajo y recopilación es que todavía hoy existe una tremenda desconexión entre agentes, desconexión que se traduce en dos planos y que se quiere ayudar a solventar con un pequeño grano de arena en esta tesis doctoral.

Primero, una desconexión entre el especialista portuario y el especialista programador, que hace que muchas de las referencias bibliográficas parezcan más un laboratorio de algoritmos, paradigmas y procesos de computación en el que simplemente se utiliza un puerto como una plataforma para presentar resultados; que un verdadero esfuerzo de expandir y hacer comprensible los resultados obtenidos a un sector de actividad (el portuario) que nada sabe de abstracciones, algoritmos de enfriamiento lento o paradigmas de simulación. Como mejor prueba de esta desconexión es que de manera generalizada estos trabajos de simulación portuaria se presentan en foros de investigación operativa, programación o simulación (como el WSC) o en revistas propias de este sector; y sólo de una manera residual en foros de especialistas en puertos o en las revistas a las que usualmente acceden los profesionales de este área.

Segundo, desconexión entre el mundo científico / académico y el mundo real portuario con tendencia además a la particularización y pocos enfoques más generalistas. Nuevamente gran parte de las referencias bibliográficas que se presentan son de un elevado tono científico – académico y parecen poco determinantes a efectos prácticos y únicamente aplicables a casos experimentales concretos en muchos casos de poco interés y en la mayoría de ellos nunca extrapolables. No se ha encontrado una sola referencia bibliográfica global que compile todas estas técnicas, más allá de un capítulo del libro de Frankel (1987) que obviamente hoy ha quedado totalmente desactualizado.

Esta desconexión y el vacío académico, mi pasión por los puertos y mi testarudez fueron el germen de la tesis.

A partir de ese momento sólo el ejemplo de mis padres, el apoyo de todos los que me han animado (especialmente mi mujer e hijos) y el aliento de mi familia para no ceder en el empeño han conseguido que después de muchos años de esfuerzo (ya he perdido la cuenta de cuantos), hoy de por finalizado un trabajo que me ha sabido a de toda una vida profesional.

Bibliografía.

1. Abd El-Nasser A Said, A. E-N.A G.; Mahmoud, A.M. y El-Horbaty, E.-S. M. (2014a). *Solving container terminals problems using computer-based modeling*. Computer Science Department, Faculty of Computer & Information Sciences, Ain Shams University (Egypt). Disponible en [fecha de acceso el 26-01-2017] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.6384.pdf>
2. Abd El-Nasser A Said, Mahmoud, A.M. y El-Horbaty, E.-S. M. (2014b). *Simulation and optimization of container terminal operations: A case study*. International Journal of Computer Science Engineering and Information Technology Research (IJCSSEITR), Vol.4 (4); pp:85-94. Disponible en [fecha de acceso el 26-01-2017] <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.6257.pdf>
3. Abdel-Fattah, A.K.; El-Tawil, A.B. y Harraz, N.A. (2013). *An Integrated Operational Research and System Dynamics Approach for Planning Decisions in Container Terminals*. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, vol.7 (10), pp: 908-914.(Disponible para descarga electrónica a la fecha de consulta (27.02.2017) en el enlace <http://waset.org/publications/17095/an-integrated-operational-research-and-system-dynamics-approach-for-planning-decisions-in-container-terminals>
4. Abdel Hafez, M. A.; Hubbard, N.J.; Tipi, N.S. y Eltawil, A.B. (2013). *A Simulation based model for the berth allocation and quay crane assignment problem*. LRN Annual Conference and PhD Workshop 2013, 4th-6th September 2013, Birmingham, UK (2013). Disponible en [fecha de acceso el 26-08-2016] http://www.academia.edu/4761020/1_A_Simulation_based_model_for_the_berth_allocation_and_quay_crane_assignment_problem
5. Abdel Hafez, M. A y Eltawil, A. (2013). *Berth allocation and quay crane assignment in Port Said port with convoy consideration in Suez Canal*. The International Maritime Transport & Logistic Conference (MARLOG 2) Sustainable Development of Suez Canal Region, Alexandria, Egypt, 17 - 19 (2013) Disponible en [fecha de acceso el 26-08-2016] http://www.academia.edu/4760957/berth_allocation_and_quay_crane_assignment_in_port_said_port_with_convoy_consideration_in_suez_canal
6. AECOM (2015). *PortOPS: Port Operations Simulation*. AECOM. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (USA). Disponible en [fecha de acceso el 15-09-2015]

- <http://www.aecom.com/What+We+Do/Transportation/Market+Sectors/Ports+and+Marine/Port+Operations+Simulation>
7. AECOM (2016a). *Port Botany Expansion*. AEMCO. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (USA). Disponible en [fecha de acceso el 20-10-2016] <http://www.aecom.com/projects/port-botany-expansion-2/>
 8. AECOM (2016b). *Colombo South Container Terminal*. AEMCO. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (USA). Disponible en [fecha de acceso el 20-10-2016] <http://www.aecom.com/projects/colombo-south-container-terminal/>
 9. AECOM (2016c). *London Gateway Port*. AEMCO. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (USA). Disponible en [fecha de acceso el 20-10-2016] <http://www.aecom.com/projects/london-gateway-port/>
 10. Agarwal, R. y Ergun, O. (2008). *Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping* Transportation Science, vol. 42 (2008).
 11. Ainouche A. y Smati A. (2002). *Optimization of LNG Chain by stochastic dynamic programming model*. 17th World Petroleum Congress, September 1-5, Rio de Janeiro, Brazil. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/254550446_Optimization_of_LNG_chain_by_stochastic_dynamic_programming_model
 12. Alali, K. y Al-Bazi A. (2013). *Management of Container Terminal Operations Using Monte Carlo Simulation*. OR55 Annual Conference-Keynote Papers and Extended Abstracts, pp: 115-121 University of Exeter, 3-5 September 2013 OR in Construction. Disponible en [fecha de acceso el 20-10-2016] http://www.theorsociety.com/Media/DocRepository/1344/KEYNOTE%20and%20EXTENDED%20ABSTRACTS%20-%20FINAL%20COPY%20OR55_06092013160222.pdf#page=122
 13. Alarcón Hernandez J.A.; Cho S.W. y Pak, M.S. (2012). *Fuel Consumption within Cargo Operations at the Port Industry. A simulation analysis on the case of S Port Company in the UK*. The Asian Journal of Shipping and Logistics; vol. 28(2), pp: 227-254. DOI: 10.1016/j.ajsl.2012.08.005. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 20-10-2016] https://www.researchgate.net/publication/257737274_Fuel_Consumption_within_Cargo_Operations_at_the_Port_Industry_A_simulation_Analysis_on_the_Case_of_S_Port_Company_in_the_UK.
 14. Ali, I.; Abouelseoud, Y. y Elwany, M-H. (2011). *Container Terminal Berth allocation and Quay Crane assignment using IP and simulated annealing*. Proceedings of the 41st

- International Conference on Computers & Industrial Engineering, pp: 31-37. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://www.usc.edu/dept/ise/caie/Checked%20Papers%20%5bruhi%2012th%20sept%5d/word%20format%20papers/REGISTRATION%20PAID%20PAPERS%20FOR%20PROCEEDINGS/pdf/15%2010%20CONTAINER%20TERMINAL%20BERTH.pdf>
15. Alzaabi, S.A.J. y Diabat, A. (2016). *On the berth allocation problem*. RAIRO Operational Research 50 (3), pp: 491-501. Disponible en <http://www.rairo-ro.org/articles/ro/pdf/2016/03/ro151066.pdf>
 16. Ambrosino, D. y Sciomachen, A. (1998): *A constraints satisfaction approach for master bay plans*. Maritime Engineering and Ports. (Editado por Sciutto, G. y Brebbia, C.A.) WIT Press, Boston, pp. 155-164.
 17. Ambrosino, D.; Sciomachen, A. y Tanfani, E. (2004). *Stowing a containership: the master bay plan problem*. Transportation Research, vol 38, pp. 81-99.
 18. Ambrosino, D.; Sciomachen, A. y Tanfani, E. (2006). *A decomposition heuristics for the container ship stowage problem*", Journal of Heuristics, vol 12, pp: 211- 233.
 19. Ambrosino, D. y Tanfani, E. (2009). *A discrete event simulation model for the analysis of critical factors in the expansion plan of a marine container terminal*. Proceedings 23rd European Conference on Modelling and Simulation ©ECMS. Editado po Javier Otamendi, Andrzej Bargiela, José Luis Montes, Luis Miguel Doncel Pedrera. ISBN: 978-0-9553018-8-9 / ISBN: 978-0-9553018-9-6 (CD) Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://www.scs-europe.net/conf/ecms2009/ecms2009%20CD/ecms2009%20accepted%20papers/lt_014_1_465a210a.pdf.
 20. Ambrosino, D.; Anghinolfi, D.; Paolucci, M. y Sciomachen, A. (2010). *An Experimental Comparison of Dif-ferent Heuristics for the Master Bay Plan Problem*, Lecture Notes in Computer Science, vol 6049, pp: 314-325.
 21. Arango, C.; Cortés, P.; Muñuzuri, J. y Onieva, L. (2011). *Berth allocation planning in Seville inland port by simulation and optimization*. Advanced Engineering Informatics, 25, pp: 452-461. Disponible en [fecha de acceso el 21.01.2017] https://io.us.es/componentes/P.Cortes/pdfs/BAP_CAP_final.pdf
 22. Arango, C.; Cortes, P.; Onieva, L.; y Escudero A. (2012a). *Modelo de optimización y simulación para la gestión de muelles del puerto de Sevilla*. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización. Vigo, july 18-20, pp: 789-797. Disponible en [fecha de acceso el

- 07.10.2016].
https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/18187/file_1.pdf?sequence=1
23. Arango, C, Cortes, P.; Onieva, L.; y Escudero A. (2012b). *Modelo de optimización y simulación para la gestión de muelles del puerto de Algeciras*. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización. Vigo, July 18-20, pp: 798-805. Disponible en [fecha de acceso el 07.10.2016].
https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/18188/file_1.pdf?sequence=1
24. Arango, C, Cortes, P.; Onieva, L.; y Escudero A. (2013). *Simulation-Optimization Models for the Dynamic Berth Allocation Problem*. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering. Volumen 28(10), pp: 769-779. Disponible en [fecha de acceso el 29-01-2016].
https://www.researchgate.net/publication/263415117_Simulation-Optimization_Models_for_the_Dynamic_Berth_Allocation_Problem
25. ARENA (2014a). *Panama Canal Utilizes Port Simulation Software for Major Expansion*. Publicación ARENA-AP006A-EN-P-august 2014. Copyright © 2014 Rockwell Automation. Rockwell Automation, 1201 Pegasus Park, Milwaukee (USA). Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016]
https://www.arenasimulation.com/resources/Panama_Port_Simulation.pdf
26. ARENA (2014b). *Paper Company Improves Shipping Efficiency with Logistics Simulation*. Publicación ARENA-AP020A-EN-P-august 2014. Copyright © 2014 Rockwell Automation. Rockwell Automation, 1201 Pegasus Park, Milwaukee (USA). Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016]
https://www.arenasimulation.com/resources/Paper_company_logistics_simulation.pdf
27. ARENA (2014c). *Logistics Modeling Uncovers Impact of Changing Barge-Dock Operations*. Publicación ARENA-AP019A-EN-P-august 2014. Copyright © 2014 Rockwell Automation. Rockwell Automation, 1201 Pegasus Park, Milwaukee (USA). Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016]
https://www.arenasimulation.com/resources/Logistics_simulation_modeling.pdf
28. ARENA (2016). *ARENA Port Terminal Simulation Software*. Rockwell Automation© ARENA Simulation Software. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]
<https://www.arenasimulation.com/industry-solutions/port-terminal-simulation-software>.
29. Aslidis, T. (1989). *Combinatorial algorithms for stacking problems*. Ph.D. Tesis Doctoral MIT. (1989)

30. Aslidis, T. (1990). *Minimizing of overstorage in containership operations*. Operational Research, vol. 90, pp. 457-471.
31. Avriel, M. y Penn, M. (1993). *Exact and approximate solutions of the container ship stowage problem*. Computers and Industrial Engineering, vol. 25(1-4), pp: 271-274.
32. Avriel, M.; Penn, M.; Shpirer, N. y Witteboon, S. (1998). *Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts*. Annals of Operations Research vol 76, pp: 55-71.
33. Avriel, M.; Penn, M. y Shpirer, N. (2000). *Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs*. Discrete Applied Mathematics. Vol. 103(1-3), pp: 271-279.
34. Ayachi I.; Kammarti, R.; Ksouri, M. y Borne P. (2010). *A Genetic algorithm to solve the container storage space allocation problem*. International conference on Computational Intelligence and Vehicular System (CIVS) 4 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 08-11-2016] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.1051.pdf>
35. Aye, W.C.; Low, M.Y.H.; Ying, H.S.; Jing, H.W; Fan, L. y Min Z. (2010). *Visualization and Simulation Tool for Automated Stowage Plan Generation System*. Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists Vil II, IMECS 2012, Marcj 17-19, Hong Kong. Disponible en [fecha de acceso el 24/06/2015] http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010_pp1013-1019.pdf
36. Aykagan, A. (2008). *Berth and quay crane scheduling: Problems, models and solution methods*. Tesis doctoral. Georgia Institute of Technology. Diciembre 2008. 185 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/26652/ak_aykagan_200812_phd.pdf
37. Bae, H. Y.; Choe, R.; Park, T. y Ryu, K. R. (2011). *Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol 22(3), pp: 413-426.
38. Baird, A.J., (2006). *Optmising the container transshipment hub location in northern Europe*. Journal of Transport Geography, vol. 14, pp: 195-214, (2006)
39. Bandeira, D.L.; Becker, J.L. y Borestein, D. (2009). *A DSS for integrated distribution of empty and full containers*. Decision Support Systems vol 47(2009), pp: 383-397. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://fulltext.study/preview/pdf/552824.pdf>
40. Barros, V.H.; Costa, T.S.; Oliveira, A. y Lorena, L.A.N. (2011). *Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints*. Computers & Industrial

- Engineering 60(4):606-613 (May 2011). DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.018. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220384641_Model_and_heuristic_for_berth_allocation_in_tidal_bulk_ports_with_stock_level_constraints
41. Béchard, V. y Côté, N. (2013). *Simulation of mixed discrete and continuous systems: An iron ore terminal example*. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (editado por R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, y M. E. Kuhl) pp: 1167-1178. Disponible a [fecha de acceso el 07/07/2015] <http://informatics-sim.org/wsc13papers/includes/files/102.pdf>
42. Bichou, H. ; Bell, M. y Evans, A. (2013). *Risk Management in Port Operations, Logistics and Supply Chain Security*. Lloyds Practical Shipping Guides. Ed. Taylor and Francis, 412 páginas. ISBN: 9781317912880.
43. Bielli, M.; Boulmakoul, A. y Rida M. (2006). *Object oriented model for container terminal distributed simulation*. European Journal of Operational Research vol.175, pp: 1731–1751. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://202.114.89.60/resource/pdf/1871.pdf>
44. Bierwirth, C. y Meisel, F. (2009). *A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints*. Journal of Scheduling vol.12, nº 4, pp: 345-360. DOI: 10.1007/s10951-009-0105-0 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/220366369_A_fast_heuristic_for_quay_crane_scheduling_with_interference_constraints
45. Bierwirth, C. y Meisel, F. (2010). *A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminal*. European Journal of Operational Research, vol. 202 (3), pp: 615-627. DOI:10.1016/j.ejor.2009.05.031. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://fulltext.study/preview/pdf/481147.pdf>
46. Bierwirth, C. y Meisel, F. (2015). *A Follow-up Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals*. European Journal of Operational Research, vol. 244(3), pp: 675-689, 2015. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714010480?np=y&npKey=d1a90a0026d28d962b4b7752cbb4557e3f1e2472acaedf09060dbf629d16f80>
47. Bin, L.; Wen-Feng, L. y Yu, Z. (2009). *Study on Modeling of Container Terminal Logistics System Using Agent-Based Computing and Knowledge Discovery*. International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 5(1), pp: 36-36. Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 1550-1329 Print/1550-1477 Online.DOI: 10.1080/15501320802524029.

- Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
<https://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2009/251681/abs/>
48. Bischoff, E.E. y Marriot, M.D. (1990). *A Comparative Evaluation of Heuristics for Container Loading*. European Journal of Operational Research, vol. 44, pp: 267-276.
 49. Bischoff, E.E. y Ratcliff, M.S.W. (1995). *Issues in the Development of Approaches to Container Loading*. Omega, vol, 23, pp: 377–390.
 50. Bischoff, E.E.; Janetz, F. y Ratcliff, M.S.W. (1995). *Loading Pallets with Nonidentical Items*. European Journal of Operational Research, vol. 84, pp: 681–692.
 51. Bischoff, E.E. (2006). *Three dimensional packing of items with limited load bearing strength*. European Journal of Operational Research, vol. 168, pp: 952–966.
 52. Bish, E.K.; Leong T.Y.; Li C.L.; Ng J.W.C. y Simchi-Levi D. (2001). *Analysis of a new vehicle scheduling and location problem*. Naval Research Logistics vol.48, pp: 363–385.
 53. Bish, E.K. (2003). *A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal*. European Journal of Operational Research vol.144, pp: 83–107.
 (2003). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 12.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/222283033_A_multiple-crane-constrained_scheduling_problem_in_a_container_terminal
 54. Bish, E.K.; Chen, F.Y.; Leong, Y.T.; Nelson, B.L.; Ng, J.W.C. y Simchi-Levi, D. (2005). *Dispatching vehicles in a mega container terminal*. OR Spectrum, vol. 27(4), pp: 491-506.
 Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/226773582_Dispatching_vehicles_in_a_mega_container_terminal
 55. Bortfeldt, A. y Gehring, H. (1998). *Ein Tabu Search-Verfahren für Containerbeladeprobleme mit schwach heterogenem Kistenvorrat*. Operations Research Spektrum vol. 20, pp: 237–250. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/251338363_Ein_Tabu_Search-Verfahren_fur_Containerbeladeprobleme_mit_schwach_heterogenem_Kistenvorrat
 56. Bortfeldt, A. y Gehring, H. (2001). *A Hybrid Genetic Algorithm for the Container Loading Problem*. European Journal of Operational Research vol. 131(1), pp: 143–161.
 Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/223079635_Hybrid_genetic_algorithm_for_the_container_loading_problem

-
57. Bortfeldt, A.; Gehring, H. y Mack, D. (2003). *A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem*. Parallel Computing, vol. 29 (5), pp: 641-662. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222406193_A_parallel_tabu_search_algorithm_for_solving_the_container_loading_problem
58. Bortfeldt, A. y Wäscher, G. (2013). *Constraints in container loading – A state-of-the-art review*. European Journal of Operational Research, vol 229(1), pp: 1–20. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171200937X>
59. Böse, J.W.; Reiners, T.; Steenken, D. y Vos S. (2000). *Vehicle dispatching at seaport container terminals using evolutionary algorithms*. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, DTM-IT, pp: 1– 10. IEEE, Piscataway. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/2817767_Vehicle_Dispatching_at_Seaport_Container_Terminals_Using_Evolutionary_Algorithms
60. Böse, J.W. (2011). *Handbook of Terminal Planning*. Springer (editado el 09/03/2011) 433 páginas. ISBN-10: 1441984070, ISBN-13: 978-1441984074.
61. Bontempi, G.; Gambardella, L.M. y Rizzoli, A.E. (1997). *Simulation and optimisation for management of intermodal terminals*. ESM'97, Istanbul. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2887472_Simulation_And_Optimisation_For_Management_Of
62. Botter, R.C. y Brinati, M. A. (1991). *Stowage Container Planning: a model for getting optimal solution*. International Conference of Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design, Rio de Janeiro, pp: 217-229.
63. Botti, V. (2004). *Multi-Agent System Technology in a Port Container Terminal Automation*. Revista European Research Consortium for Informatics and Mathematics (ERCIM), vol 56, pp: 37-39. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] http://www.ercim.eu/publication/Ercim_News/enw56/botti.html
64. Brent, R. P. (1973). *Algorithms for Minimization without Derivatives*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 224 páginas. ISBN-10: 0130223352 / ISBN-13: 978-0130223357.
65. Briano, E.; Caballini, C.; Mosca, M. y Revetria, R. (2008). *Modelling of Voltri Terminal Europe in Genoa Using System Dynamic Model Simulation*. Proc. System Science and Simulation in Engineering. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016)

https://www.researchgate.net/publication/261857932_Modelling_of_Voltri_terminal_Europe_in_Genoa_using_system_dynamic_model_simulation

66. Briano, E.; Caballini, C.; Mosca, M. y Revetria, R. (2009). *A system dynamics decision cockpit for a container terminal: The case of Voltri Terminal Europe*. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. vol. 3(2), pp: 55-64. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) <http://www.naun.org/main/NAUN/mcs/mcs-108.pdf>
67. Bridi, I.; Alvarenga, R., Cezana, T. y Matos, G. (2016). *Mathematical model for the Berth Allocation Problem in ports with cargo operation limitations along the pier*. *Gestão & Produção* Volumen 23(4). Print version ISSN 0104-530X. On-line version ISSN 1806-9649. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x2266-15>. Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-530X2016000400771&script=sci_arttext&tlng=en
68. Briskorn, A.; Drexler, A. y Hartmann, S. (2006). *Inventory-based dispatching of automated guided vehicles on container terminals*. *OR Spectrum*. Volumen 28(4), pp: 611–630
69. Brouer, B.D.; Pisinger, D. y Spoorendonk, S. (2011). *Liner Shipping Cargo Allocation with Repositioning of Empty Containers*. *Information Systems and Operational Research (INFOR'2011)*, volume 49(2), pp: 109-124 (2011).
70. Brown, G. G.; Cormican, K. J.; Lawphongpanich, S. y Widdis, D. (1997). *Optimizing submarine berthing with a persistence incentive*. *Naval Research Logistics*, 44(4), 301-318. Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6750\(199706\)44:4<301::AID-NAV2>3.0.CO;2-A](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1520-6750(199706)44:4<301::AID-NAV2>3.0.CO;2-A)
71. Bruno, G.; Ghiani, G. e Improta, G. (2000). *Dynamic positioning of idle automated guided vehicles*. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Vol 11(2), pp: 209-215. doi:10.1023/A:1008947018074. Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1008947018074>
72. Bruzzone, A. y Signorile, R. (1998). *Simulation and genetic algorithms for ship planning and shipyard layout*. *SIMULATION* vol. 71(2), pp: 74-83. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220164632_Simulation_and_Genetic_Algorithms_for_Ship_Planning_and_Shipyard_Layout
73. Budipriyanto, A; Wirjodirdjo, B.; Pujawan, N. y Gurning, S. (2015). *Berth allocation problem under uncertainty: A conceptual model using collaborative approach*. *Procedia Manufacturing* 4 (2015) 429 – 437 (Industrial Engineering and Service Science 2015, IESS 2015). Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] <http://ac.els->

- cdn.com/S2351978915011750/1-s2.0-S2351978915011750-main.pdf?_tid=b836f528-e63d-11e6-a92d-00000aab0f02&acdnat=1485706524_91175cea69613907a5a2d4b2f58aae8c
74. Buffa, S.E.; Armout, G.C. y Vollmann, T.E. (1964). *Allocating Facilities with CRAFT*. Harvard Business Review, March-April 1964, 136
75. Bugarcic, U. y Petrovic, D. (2002). *Modeling and Simulation of Specialized River Terminals for Bulk Cargo Unloading with Modeling of the Elementary Sub-Systems*. Systems Analysis Modelling Simulation, vol. 42(10), pp: 1455-1482. DOI: 10.1080/713745639. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/233025626_Modeling_and_Simulation_of_Specialized_River_Terminals_for_Bulk_Cargo_Unloading_with_Modeling_of_the_Elementary_Sub-Systems
76. Bugarcic, U. y Petrovic, D. (2007). *Increasing the capacity of terminal for bulk cargo unloading*. Simulation Modelling Practice and Theory vol.15(10), pp: 1366-1381. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X07001165>
77. Bugarcic, U.; Petrovic, D.; Petrovic, Z.; Pajcin M.; y Markovic-Petrovic, G. (2011). *Determining the Capacity of Unloading Bulk Cargo Terminal Using Queuing Theory*. Journal of Mechanical Engineering vol. 57(5), pp: 405-416. . Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://www.svjme.eu/data/upload/2011/05/05_2009_084_Bugarcic_05.pdf
78. Bugarcic, U.; Petrovic, D.B.; Jeli Z.; y Petrovic, D.V. (2012). *Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading*. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, vol. 88(12), pp: 1508-1521. DOI: 10.1177/0037549712459773. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/258188085_Optimal_utilization_of_the_terminal_for_bulk_cargo_unloading
79. Buhrkal, K.; Zuglian, S.; Ropke, S.; Larsen, J., y Lusby, R. (2011). *Models for the discrete berth allocation problem: a computational comparison*. Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review, 47(4), pp: 461-473. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2010.11.016>
80. Burnett, G.A.; Finke, D. A.; Medeiros, D. J. y Traband, M.T. (2008). *Automating the development of shipyard manufacturing models*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (Editado por S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönnch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler), pp: 1761-1767. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016]

https://www.researchgate.net/publication/221528457_Automating_the_development_of_Shipyard_manufacturing_models

81. Caballini, C.; Sacone, S. y Siri, S. (2012). *The port as a system of systems: a System Dynamics simulation approach*. 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 2012, pp: 411-417. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/profile/Silvia_Siri/publication/261152517_The_port_as_a_system_of_systems_A_System_Dynamics_simulation_approach/links/5461d8340cf27487b4530d29?ev=pub_int_doc_dl&origin=publication_detail&inViewer=true
82. Cáceres, R.; Mendoza, H.; Tuñón, G.; Rabelo, L.C. y Pastrana J. (2015). *Modeling and Simulation of Berthing Processes for a Panamanian Container Terminal using BPMN and Discrete Event Simulation*. Proceedings of the 2015 International Conference on Operations Excellence and Service Engineering. Orlando, Florida (USA), 10-11 de Septiembre de 2015. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://ieomsociety.org/IEOM_Orlando_2015/papers/259.pdf
83. Canonaco, P.; Legato, P.; Mazza, R.M. y Musmanno R. (2008). *A queuing network model for the management of berth crane operations*. Computers & Operations Research, vol. 35(8), pp: 2432–2446. Disponible en [fecha de acceso el 12.12.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054806002991>
84. Cao, B. y Uebe, G. (1993). *An algorithm for solving capacitated multicommodity p-median transportation problems*. Journal of the Operational Research Society, vol 44(3), pp: 259–269. Disponible en [fecha de última consulta el 27.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1057/jors.1993.51?no-access=true>
85. Cao B y Uebe, G. (1995). *Solving transportation problems with nonlinear side constraints with tabu search*. Computers & Operations Research, vol 22, pp: 593–603.
86. Cao, Z.; Lee, D.H. y Meng, Q. (2008). *Deployment strategies of double-rail-mounted gantry crane systems for loading outbound containers in container terminals*. International Journal of Production Economics, vol. 115(1), pp: 221–228. Disponible en [fecha de última consulta el 27.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552730800203X>
87. Cao, J.; Qixin, S. y Lee D.-H. (2010). *Integrated Quay Crane and Yard Truck Schedule Problem in Container Terminals*. Tsingua Science & Technology. Volume 15(4), pp: 467-474.
88. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014a). *Storage yard operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions*. European Journal

- Operational Research 235(2), pp: 412–430. ©. Disponible en [fecha de última consulta el 04.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713008771>
89. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014b) *Transport operations in container terminals: literature overview, trends, research directions and classification scheme*. European Journal Operational Research 236, pp: 1–13. Disponible bajo petición en [fecha de última consulta el 04.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/260556440_Transport_operations_in_container_terminals_Literature_overview_trends_research_directions_and_classification_scheme
90. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2015). *Seaside Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions*. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 27(2-3), pp: 224-262. Borrador disponible en [fecha de última consulta el 27.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10696-013-9178-3>.
91. Carlucci, F. y Cira, A. (2009). *Modelling a plan for seaport investments through a system dynamics approach*. Pomorstvo, vol. 23(2), pp. 405–425. Disponible en [fecha de última consulta el 27.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/266272688_Modeling_a_plan_for_seaport_investments_through_a_system_dynamics_approach
92. Carrascosa, C.; Rebollo, M.; Julian, V. y Botti, V. (2001). *A MAS approach for port container terminal management: the transtainer agent*. Actas de SCI'01, pp 1–5. International Institute of Informatics and Systemics, Orlando, FL (2001). [fecha de última consulta el 27.02.2017] http://users.dsic.upv.es/~vinglada/download/MAS_workshop_final.pdf
93. Carteni, A.; Cantarella, G.E. y de Luca, S. (2005). *A simulation model for a container terminal*. Proceedings of the European Transport Annual Meeting: Transportation Planning Methods, PTRC, Strasboug (France) (18-20 Septiembre 2005). 17 páginas Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] abstracts.aetransport.org/paper/download/id/2201
94. Carteni, A. y de Luca, S. (2009a). *Simulation of a container terminal through a discrete event approach: Literature review and guidelines for application*. Association for European Transport. AET 2009: European Transport Conference, (5-7 de Octubre de 2009). Noordwijkerhout (Holanda).. 21 páginas. ISBN 978-1-905701-04-9. Disponible en [fecha de acceso el 17.01.2017] abstracts.aetransport.org/paper/download/id/3148.

95. Carteni, A. y de Luca, S. (2009b). *A micro-Simulation of the Salerno Container Terminal*. Technical Paper, Department of Civil Engineering, University of Salerno. Disponible en [fecha de acceso el 17.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/228916972_A_micro_simulation_model_for_the_Salerno_Container_Terminal
96. Carteni, A. y De Luca, S. (2012). *Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 21, pp: 123-145. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220674619_Tactical_and_strategic_planning_for_a_container_terminal_Modelling_issues_within_a_discrete_event_simulation_approach
97. Caserta, M.; Schwarze, S y Voß, S. (2011). *Container Rehandling at Maritime Container Terminals*. Capítulo 13 del libro “*Handbook of Terminal Planning*” Springer-Verlag New York (Editado por Jürgen W. Böse). ISBN978-1-4419-8407-4. 433 páginas.
98. Castilho, B. y Daganzo, C. F. (1993). *Handling strategies for import containers at marine terminals*. Transportation Research-B 27(2), pp: 151–166. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019126159390005U>
99. Černý, V. (1985). *Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm*. Optimization Theory and Applications. Vol 45(1), pp: 41-51. doi:10.1007/BF00940812. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00940812>
100. Chan S.H. (2001). *DynamicAGV-container job deployment strategy*. Master of Science, National University of Singapore. (2001). Disponible para lectura online en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.docin.com/p-939155213.html>
101. Chang H, Y.; Yong S.C. y Tae Y.H. (2004). *Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals*. OR Spectrum March 2004, vol 26(2), pp: 149-170. Disponible en [fecha de última consulta 21.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-003-0151-5?no-access=true>
102. Chang, D., Yan, W., Chen, C.-H., & Jiang, Z. (2008). *A berth allocation strategy using heuristics algorithm and simulation optimization*. International Journal of Computer Applications in Technology, 32(4), 272-281. Disponible en [fecha de última consulta 07.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1504/IJCAT.2008.021382>.

103. Chang, D.; Jiang, Z.; Yan, W., y He, J. (2010). *Integrating berth allocation and quay crane assignments*. Transportation Research Part E 46, pp: 975–990. Disponible en [fecha de última consulta 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/223353648_Integrating_berth_allocation_and_quay_crane_assignments
104. Chen C. S.; Lee, S. M. y Shen, Q.S. (1995). *An analytical model for the container loading problem*. European Journal of Operational Research, vol 80, pp: 68–76.
105. Chen, L. (1998). *Optimisation problem in a container port*. M.Sc. Research Report, SoC, NUS
106. Chen, T. (1999). *Yard operations in the container terminal – a study in the ‘unproductive moves’*. Maritime Policy and Management vol 26, pp: 27–38.
107. Chen, C.-Y. y Hsieh, T. W. (1999). *A time-space network model for the berth allocation problem*. Proceedings of the 19th Conference on System Modeling and Optimization. Cambridge: Kluwer Academic Publishers.
108. Chen, P.; Fu, Z.; Lim, A. y Rodrigues, B. (2003). *The General Yard Allocation Problem*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference - GECCO 2003(Chicago, USA) 12-16 Julio 2003. Part II. Lecture Notes in Computer Science 2724, pp: 1986-1997 · Enero 2003. DOI: 10.1007/3-540-45110-2_97
109. Chen, C.-Y. y Chao, S. L. (2004). *A time-space network model for allocating yard storage space for export containers..* Transportation Planning Journal. Volumen 33(2), pp: 227-248. Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.5872&rep=rep1&type=pdf>
110. Chen, L., Bostel; N., Dejax, P.; Cai, J. y Xi, L. (2007). *A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal*. European Journal of Operational Research, vol.181, pp: 40–58. Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/222147328_A_tabu_search_algorithm_for_the_integrated_scheduling_problem_of_container_handling_systems_in_a_maritime_terminal
111. Chen, A. I. H. C.; Nishimura, E. y Papadimitriou, S. (2008). *The simultaneous berth and quay crane allocation problem*. Transportation Research, PartE, vol. 44, pp: 900-920.
112. Chen, J.H.; Lee, D.-H., y Cao J.X. (2011). *Heuristics for quay crane scheduling at indented berth*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.

- Volumen 47(6) (Noviembre 2011) Páginas 1005–1020. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554511000469?np=y&npKey=b06b18f5526c48a6f3370fdd9a14b29314f1b8762c782b3cb9e45861601d19b7>.
113. Chen, F. y Wang, C. (2013). *Empty container reposition optimization model with feeder transportation*. International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA) 2013: Trade, Supply Chain Activities and Transport: Contemporary Logistics and Maritime Issues (2013) Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] http://www.hksoa.org/contents/attachments/Presentations/2013/IFSPA2013/Papers/M4_3.pdf.
 114. Cheng, L. Y. (2001). *Simulation study of dynamic AGV-container job deployment scheme*. Master of Science, National University of Singapore. (2001) - HPCES Programme, Singapore-MIT Alliance. 10 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/4014/HPCES023.pdf>
 115. Cheng, Y. L.; Sen, H. C.; Natarajan, K.; Teo, C. P. y Tan, K. C. (2005). *Dispatching automated guided vehicles in a container terminal*. J. Geunes and P. M. Pardalos (Eds), Supply Chain Optimization, Applied Optimization, Springer. (2005) Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) <http://bschool.nus.edu/staff/bizteocp/agv3.pdf>
 116. Cheng, J. K., Tahar, R. M., & Ang, C.-L. (2010). *Understanding the Complexity of Container Terminal Operation Through the Development of System Dynamics Model*. International Journal of Shipping and Transport Logistics, vol. 2(4), pp: 429-443. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJSTL.2010.035503>
 117. Cheong, C. Y.; Lin, C. J., Tan, K. C. y Liu, D. K. (2007). *A multi-objective evolutionary algorithm for berth allocation in a container port*. Congress on Evolutionary Computation 2007 (CEC 2007) (pp. 927-934). Singapore: IEEE. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.2007.4424569>.
 118. Cheong, C.Y., Tan, K.C., Liu, D.K., y Lin, C.J. (2010). *Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports*. Annals of Operations Research, 180(1), pp: 63-103. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-008-0493-0>.
 119. Cheung, R. K. y Chen, C. Y. (1998), *A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem*. Transportation Science vol 32(2), pp: 142–162. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220413042_A_Two-

Stage Stochastic Network Model and Solution Methods for the Dynamic Empty Container Allocation Problem

120. Cheung, R. K.; Li, C. L.; Lin, W., (2002). *Inter block crane deployment in container terminals*. Transportation Science, vol 36(1), pp: 79-93. . Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] https://www.jstor.org/stable/25768983?seq=1#page_scan_tab_contents
121. Chia, J.T.; Lau, H.C. y Lim, A. (1999). *Ant colony optimization for the ship berthing problem*. P.S. Thiagarajan, R. Yap (Eds.). Lecture Notes Advances in Computing Science. ASIAN'99 Volumen 1742, pp. 359-370. Disponible en [fecha de acceso el 12.02.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-46674-6_30?no-access=true
122. Choi, Y.S. y Yun, W.Y. (2000). *Simulator for Port Container Terminal Using an Object-Oriented Approach*. Report, Brain Korea 21 Logistics Team. Industrial Engineering/Busan National University. Disponible en [fecha de acceso el 12.02.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/56bc/08cb17ffbdaa62f77316586562b9182786e6.pdf>
123. Choi, Y.S. y Ha, T.Y (2004). *Simulation application for container terminal Using an Object-Oriented Simulation*. Korea Maritime Institute, vol. 19 (2), pp: 211-238 Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01812322>
124. Choo, S. (2006). *The crane split and sequencing problem with clearance and yard congestion constraints in container terminal ports*. Tesis Doctoral - Massachusetts Institute of Technology, Computation for Design and Optimization Program. Disponible en [fecha de acceso el 15.09.2016] <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39219/85844395.pdf?sequence=1>
125. Choo, S.; Klabjan, D. y Simchi-Levi, D. (2010). *Multiship crane sequencing with yard congestion constraints*. Transportation Science 44(1), pp. 98-115. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220413369_Multiship_Crane_Sequencing_with_Yard_Congestion_Constraints.
126. Choong, S.T.; Cole M.H. y Kutanoglu, E. (2002). *Empty container management for intermodal transportation networks*. Transportation Research Part E 38, pp.: 423–438.
127. Chung, S.H. y Choy, K.L. (2012). *A modified genetic algorithm for quay crane scheduling operations*. Expert Systems with Applications. Volumen 39, pp: 4213–4221. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417411014369>

128. Chung, S.H. y Chan F.T.S. (2013). *A workload balancing genetic algorithm for the quay crane scheduling problem*. International Journal of Production Research . Volume 51 (16), pp: 4820-4834 <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.774489>. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017]. <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2013.774489?scroll=top&needAccess=true>
129. Collier, P. I. (1980). *Simulation as an aid to the study of a port as a system*. Computer Application in Shipping and Shipbuilding, vol. 7, pp: 51-56.
130. Comer, E. y Taborga, P.N. (1974). *Port simulation model (PORTSIM), user's manual*. The World Bank, Washington (USA).
131. Cordeau, J.F.; Laporte, G.; Legato, P. y Moccia P. (2005a). *Models and Tabu Search Heuristics for the Berth-Allocation Problem*. Transportation Science, volumen 39(4), pp: 526-538. DOI: 10.1287/trsc.1050.0120. Disponible en [feccha de último acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220413251_Models_and_Tabu_Search_Heuristics_for_the_Berth-Allocation_Problem
132. Cordeau, J. -F.; Gaudioso, M.; Laporte, G. y Moccia, L. (2005b). *A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal*. AIRO annual conference. Amerino (Italia), 6–9 Septiembre 2005.
133. Cordeau, J. F.; Gaudioso, M.; Laporte, G. y Moccia, L. (2007). *The service allocation problem at the Gioia Tauro maritime terminal*. European Journal of Operational Research 176: 1167–1184. (2007). Disponible en [feccha de último acceso el 25.10.2016] <http://neumann.hec.ca/chairedistributique/common/SAP.pdf>
134. Cormen, T. H.; Leiserson, C.E. y Rivest, R. L. (1990). *Introduction to Algorithms (1st Edition)*. MIT Press and McGraw-Hill. ISBN 0-262-03141-8.
135. Cormen, T.H.; Leiserson, C.E.; Rivest, R.L. y Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms*. Capítulo 16 "Greedy Algorithms". MIT Press. 1312 páginas. ISBN: 9780262033848
136. Cortés , P.; Muñuzuri , J.; Ibáñez, J.N. y Guadix, J. (2007). *Simulation of freight traffic in the Seville inland port*. Simulation Modelling Practice and Theory . Volumen 15(3), pp: 256–271. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://io.us.es/componentes/P.Cortes/pdfs/Sim_freight_Seville_inland_Port.pdf

-
137. Crainic, T. G.; Gendreau, M. y Dejax, P. (1993). *Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers*. Operations Research vol 41, pp: 102–126.
138. Christiansen, M. y Nygreen, B. (1998). *A method for solving ship routing problems with inventory constraints* Annals of Operations Research, vol. 81, pp. 357-378.
139. Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2004). *Ship routing and scheduling: Status and perspectives*. Transportation Science, 38(1), pp: 1–18.
140. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., y Ronen, D. (2007). *Maritime transportation*. In “*Handbooks in operations research & management science: Vol. 14. Transportation*”, pp: 189–284 (Editado por C. Barnhart & G. Laporte). Amsterdam: Elsevier B.V. DOI: 10.1016/S0927-0507(06)14004-9 Disponible en [fecha de acceso el 15-11-2016]
https://www.researchgate.net/profile/Kjetil_Fagerholt/publications?sorting=newest&pubType=article&page=5
141. Christiansen, M., y Fagerholt, K. (2008). *Maritime inventory routing problems*. In C. A. Floudas & P. M. Pardalos (Eds.), Encyclopedia of optimization (2nd Edition) (pp. 1947–1955). Publisher: Springer; 2nd edition (September 4, 2008). 622 pages. ISBN-10: 0387747583. ISBN-13: 978-0387747583
142. Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Hasle, G.; Minsaas, A. y Ronen, D. (2009). *Maritime Transport Optimization: An ocean of opportunities*. Operational Research Today (OS Today) Abril 2009, pp: 26-31. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/237494127_AN_OCEAN_OF_OPPORTUNITIES
143. Cyr, R.W. (1992). *Using animation to enhance a marine-terminal Monte Carlo simulator*. Proceedings of the 24th Winter Simulation Conference – Año 1992. Editado por J.L. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain y J.R. Wilson, pp: 1000-1003. ISBN:0-7803-0798-4. doi>10.1145/167293.167808. Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016]
http://informs-sim.org/wsc92papers/1992_0132.pdf
144. Daganzo, C.F. (1989). *The crane scheduling problem*. Transportation Research B Volumen 23 (3), pp: 159–175. Disponible en [fecha de acceso el 23-10-2016]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261589900015>
145. Daganzo, C. F. (1990a). *Crane productivity and ship delay in ports*. Transportation Research Record, Vol 1251(1990), pp: 1-9. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26.10.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/291155457_Crane_productivity_and_ship_delay_in_ports
146. Dahal, K.P.; Galloway, S.; Burty, G.M.; McDonald, J.R. y Hopkins, I. (2003). *A port system simulation facility with an optimization capability*. International Journal of Computational Intelligence and Applications, Vol. 3(4), pp. 395-410, 2003. DOI: 10.1142/S1469026803001099. Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220606287_A_Port_System_Simulation_Facility_With_An_Optimization_Capability
 147. Dahal, K.P.; Galloway S.J.; Burt, G.M.; McDonald, J.R. y Hopkins, I. (2005). *A Case Study of Process Facility Optimization using Discrete Event Simulation and Genetic Algorithm*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'05, 25-29 Junio 2005, Washington, DC (USA). (2005). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220740838_A_case_study_of_facility_optimization_using_discrete_event_simulation_and_algorithm
 148. Dai, J.; Lin, W.; Moorthy, R. y Teo C.P. (2004). *Berth Allocation Planning Optimization in Container Terminal*, Primera versión (no editada) - Working Paper, Georgia Institute of Technology, National University of Singapore, de fecha 2004 disponible en [fecha de acceso el 15-09-2014)]<http://bschool.nus.edu/staff/bizteocp/berthplanningjuly2004.pdf>. Posteriormente publicada en Dai *et al.* (2008).
 149. Dai, J.; Lin, W.; Moorthy, R. y Teo, C.P. (2008). *Berth allocation planning optimization in container terminals*, en C. S. Tang, C. P. Teo y K. K. Wei (eds.) Supply Chain Analysis, vol. 119 de International Series in Operations Research & Management Science, pp: 69–104. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <https://people.orie.cornell.edu/jdai/publications/daiLinMoorthyTeo08.pdf>
 150. Daskin, M. y Walton, C.M. (1983). *An approximate analytic model for supertanker lightering operations*. Transportation Research B 17, pp: 201-219. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 17-10-2016] https://www.researchgate.net/publication/23526991_An_approximate_analytic_model_of_supertanker_lightering_operations
 151. Davidsson, P., Henesey, L. E., Ramstedt, L., Törnquist, J., y Wernstedt, F., (2005a). *Agent-Based Approaches to Transport Logistics*. Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation: Whitestein Series in Software Agent Technologies, pp: 1-15 (Bazzan, Ana; Klügl, Franziska; Ossowski, Sascha). Editado por Birkhäuser. 10.1007/3-7643-7363-6_1. ISBN 978-3-7643-7258-3. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-7643-7363-6_1

152. Davidsson, P.; Henesey, L. E.; Ramstedt, L.; Törnquist, J. y Wernstedt, F. (2005b). *Agent-Based Approaches to Transport Logistics*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol 13(4), pp: 255-271. DOI: 10.1016/j.trc.2005.07.002 Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/222649741_Agent-Based_Approaches_to_Transport_Logistics
153. Davies, A.P. y Bischoff, E.E. (1998). *Weight distribution considerations in container loading*. Working Paper, European Business Management School, Statistics and OR Group, University of Wales, Swansea. Posteriormente también publicado en European Journal of Operational Research 114: 509–527. (1999).
154. Davis, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York. Hardcover.: Van Nostrand Reinhold; 1ª Edición (Enero 1991). 385 Páginas. ISBN-10: 0442001738 / ISBN-13: 978-0442001735.
155. Dekker R.; Voogd P. y van Asperen, E. (2006). *Advanced methods for container stacking*. OR Spectrum 28(4), pp: 563-586. Disponible en [fecha de acceso el 17-01-2017] https://www.researchgate.net/publication/226468887_Advanced_methods_for_container_stacking
156. Delgado A. y Jensen S. C. (2009). *Generating Optimal Stowage Plans for Container Vessel Bays*. Principles and Practice of Constraint Programming – CP, pp: 6- 20.
157. Delorme, X.; Gandibleux, X. y Rodriguez, J. (2003). *GRASP for set packing problems*. European Journal of Operational Research. Vol 153 (3); pp: 564-580. Disponible en [fecha de acceso el 21-11-2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00263-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00263-7)
158. Demirci, E. (2003). *Simulation Modelling and Analysis of a Port Investment*. SIMULATION, Vol. 79,(2), pp: 94-105 The Society for Modeling and Simulation International. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] <http://simulation.su/uploads/files/default/2003-emrullah-demirci.pdf>
159. Di Francesco, M. (2007). *New optimization model for empty container management*. Tesis Doctoral. Universidad de Cagliari. (2007). Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] http://veprints.unica.it/107/1/di_francesco_massimo.pdf
160. Dijkstra, E.W. (1959). *A Note on Two Problems in Connexion with Graphs*. Numerische Mathematik 23 (3) (1959), pp: 269–271. . Disponible en [fecha de acceso el 12-07-2016] <http://www-m3.ma.tum.de/foswiki/pub/MN0506/WebHome/dijkstra.pdf>
161. Dragović, B.; Park, N.K.; Radmilović, Z. y Maraš, V. (2005a). *Simulation modeling of ship-berth link with priority service*. Maritime Economics & Logistics, Vol. 7(4), pp. 316-

- 335, (2005). doi:10.1057/palgrave.mel.9100141 Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) <http://link.springer.com/article/10.1057/palgrave.mel.9100141>
162. Dragović, B.; Park, N. K. y Maraš, V. (2005b). *Simulation modeling of ship-berth link in container port*. IAME Conference, Limasol, Kipar, June, p. 10. Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fpalgrave.mel.9100141>
163. Dragović B., Park N. K. y Radmilović Z. (2006a). *Ship-berth link performance evaluation – simulation and analytical approaches*. Maritime Policy & Management, 2006, 33(3), 281-299. (2006). DOI: 10.1080/03088830600783277 Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/233548170_Ship-berth_link_performance_evaluation_Simulation_and_analytical_approaches
164. Dragović B.; Zrnić N. Dj.; Radmilović, Z. (2006b). *Ports & container terminals modeling*. Research Monograph, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade (2006). ISBN 86-7395-203-4.
165. Dragović, B.; Park, N.K.; Meštrović, R. y Mihaljević, N. (2009a). *Container terminals modelling: New approaches to investigation*. Proceeding of The Annual IAME Conference – IAME2009, 24-26.06.2009, Copenague (Dinamarca), pp: 1-20.
166. Dragović, B.; Park, N.K.; Meštrović, R.; Kim. J.Y; Raskovic, M. y Mihaljević, N. (2009b). *Modeling and optimizacion of container terminal operations*. 9th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry"- RaDMI 2009(16 – 19 Septiembre 2009) Vrnjačka Banja, Serbia. pp 29-42- Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) <http://satcip.com/radmi/pdf/RaDMI-2009-Proceedings-Vol.1.pdf>
167. Dragović, B., Zrnić, Dj. N., Twrdy, E., Rooy, DK., (2010). *Ship traffic modelling and performance evaluation in container port*. Analele Universităţii "Eftimie Murgu", 2010, XVII(2), 127-138. (2010). Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/227635704_Ship_Traffic_Modeling_and_Performance_Evaluation_in_Container_Port
168. Dragović, B. Tzannatos, E. y Park, N.P. (2016). *Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool*. Flexible Services and Manufacturing Journal, pp: 1-31. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10696-016-9239-5>
169. Drira, A.; Pierreval, H. y Hajri-Gabouj S. (2007). *Facility layout problems: A survey*. Annual Reviews in Control 01/2007 - Elsevier Ltd. Disponible en [decha e último acceso el 15.01.2017]

- http://www.researchgate.net/publication/223507648_Facility_layout_problems_A_survey
170. Drucker, N. y Campbell, K. (2015). *An Adaptive Planning Tool for Ship Construction Warehouse Capacities*. MODSIM World 2015. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]
http://modsimworld.org/papers/2015/An_Adaptive_Planning_Tool_for_Ship_Construction_Warehouse_Capacities.pdf.
 171. Dubrovsky, O.; Levitin, G. y Penn M. (2002). *A genetic algorithm with a compact solution encoding for the container ship stowage problem*. Journal of Heuristics vol 8, pp: 585–599. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]
<http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1020373709350>
 172. Duinkerken, M.B. y Ottjes, J.A. (2000). *A simulation model for automated container terminals*. Proceedings of the Business and Industry Simulation Symposium (ASCT 1999) – April 2000 Wahsington DC [SCS]. ISBN 1-56555-199-0. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.tomasweb.com/publications/was0004a.pdf>
 173. Dundovic, C.; Bilic , M. y Dvornik, J. (2009). *Contribution to the development of a simulation model for seaport in specific operatind conditions*. Promet – Traffic&Transportation, Vol. 21, 2009, No. 5, 331-340. Disponible en [fecha de acceso el 15.02.2017] www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/248/153
 174. Dvornik, J.; Munitic, A.y Bilic, M. (2006). *Simulation modelling and heuristic optimization of material flow of the port cargo system*. Promet- Traffic&Transportation, Vol. 18, 2006, No. 2, PP. 123-135. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/298579491_Simulation_Modelling_and_Heuristics_Optimization_of_Material_Flow_of_the_Port_Cargo_System
 175. Easa, M.S. (1987). *Approximate queueing models for analyzing harbor terminal operations*. Transportation Research B, 1987, 21(4), pp: 269-286. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/23527162_Approximate_queueing_models_for_analyzing_harbor_terminal_operations
 176. Eisenberg, R.; Stahlbock, R.; Voß S. y Steenken, D. (2003). *Sequencing and scheduling of movements in an automated container yard using double rail-mounted gantry cranes*”. Working paper, University of Hamburg.
 177. El Sheik, A.S.R.; Paul R.Y., Harding, A.S. y Balmer, D. W. (1987). *A microcumpter-based simulation study of a port*. The Journal of the Operational Research Society, Vol.

- 38(8), Current Simulation Research (Aug., 1987), pp. 673-681. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.jstor.org/stable/2582839?seq=1#page_scan_tab_contents
178. Elentably, A. (2015). *Simulation of a Container Terminal and it's reflect on Port Economy*. Paper 27 of the Smart Rivers 2015 Congress (PIANC) – Buenos Aires 7-11 Septiembre 2015. 8 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] http://www.pianc.org.ar/_stage/pdf/papers_sr2015/27_paper_Elentably_SAU_1.pdf
 179. Eley, M. (2002). *Solving Container Loading Problems by Block Arrangement*. European Journal of Operational Research, vol 141, pp: 393–409. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00133-9. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/222570028_Solving_container_loading_problems_by_block_arrangement
 180. Eley, M. (2003). *A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem*. OR Spectrum vol 25, pp: 54–60. (2003).
 181. Eltawil, A. (2013). *A systematic approach to container terminal planning and operational decision making*. The International Maritime Transport & Logistic Conference (MARLOG 2) Sustainable Development of Suez Canal Region, Alexandria, Egypt, 17 - 19 Marzo (2013).
 182. Elwany M.H.; Ali, I. y Abouelseoud, Y. (2013). *A heuristics-based solution to the continuous berth allocation and crane assignment problem*, Alexandria Engineering Journal Volume 52, Issue 4, December 2013, Pages 671–677 (2013). Disponible en [fecha de acceso el 21-12-2016] https://www.researchgate.net/publication/259143771_A_heuristics-based_solution_to_the_continuous_berth_allocation_and_crane_assignment_problem
 183. Eneyo, E.S. y Pannirselvam, G.P. (1998). *The Use of Simulation in Facility Layout Design: A Practical Consulting Experience*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Editado por D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson y M.S. Manivannan, pp: 1527-1532. Disponible en [fecha de acceso el 30.01.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc98papers/208.PDF>
 184. Engelen, S.; H. Meersman y E.V. Voorde (2006). *Using System Dynamics in Maritime Economics: an Endogenous Decision Model for Shipowners in the Dry Bulk Sector*. Maritime Policy and Management, vol 33(2), pp: 141-158. DOI: 10.1080/03088830600612807. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088830600612807>

185. Evers, J.J.M. y Koppers, S.A.J. (1996). *Automated Guided Vehicle traffic control at a container terminal*. Transportation Research. Vol 30(1), pp: 21-34. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0965856495000119>
186. Fagerholt, K. (1999). *Optimal fleet design in a ship routing problem*. International Transactions in Operational Research, vol. 6, pp. 453-464 (1999). Disponible en [fecha de acceso el 24.11.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-3995.1999.tb00167.x/references>
187. Fagerholt, K. (2004a). *A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling - Experience and future research*. Decision Support Systems 37(1), pp: 35-47 · April 2004. DOI: 10.1016/S0167-9236(02)00193-8. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]. [https://www.researchgate.net/publication/222659256_A_computer-based_decision_support_system_for_vessel_fleet_scheduling - Experience_and_future_research](https://www.researchgate.net/publication/222659256_A_computer-based_decision_support_system_for_vessel_fleet_scheduling_-_Experience_and_future_research)
188. Fagerholt, K. (2004b). *Designing optimal routes in a liner shipping problem*. Maritime Policy & Management, vol 31(4), pp: 259-268. DOI: 10.1080/0308883042000259819. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/248989186_Designing_optimal_routes_in_a_liner_shipping_problem
189. Fagerholt, K. y Lindstad, H. (2007). *TurboRouter: An interactive optimisation-based decision support system for ship routing and scheduling*. Maritime Economics and Logistics 9, 214-233. (2007). DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100180 · Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/5223645_TurboRouter_An_Interactive_Optimisation-Based_Decision_Support_System_for_Ship_Routing_and_Scheduling
190. Fagerholt K.; Hvattum, L.M.; Johnsen, T.A.V.; y Korsvik J.E. (2011). *Routing and scheduling in project shipping*. Annals of Operations Research (Mayo-2011). Publicación online, más tarde publicado en Fagerholt *et al.* (2013). Disponible en [fecha de acceso el 20-12-2015] <http://paperity.org/p/11991554/routing-and-scheduling-in-project-shipping>
<http://paperity.org/p/11991554/routing-and-scheduling-in-project-shipping>
191. Fagerholt, K. y Ronen, D. (2013). *Bulk ship routing and scheduling: solving practical problems may provide better results*. Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research , vol 40(1), pp.: 48-64 (2013). Disponible en [fecha de último acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/262003981_Bulk_ship_routing_and_scheduling_Solving_practical_problems_may_provide_better_results

192. Fagerholt, K.; Hvattum, L.M.; Johnsen, T. A. V. y Korsvik, J.E. (2013). *Routing and scheduling in project shipping*. Annals of Operations Research , vol 207(1); pp: 67-81, (2013). DOI: 10.1007/s10479-011-0888-1. Disponible en [fecha de último acceso el 24.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/238487232_Routing_and_scheduling_in_project_shipping
193. Fan, L.; Low, M.Y.H.; Ying, H.S.; Jing, H.W.; Min, Z. y Aye, W.C. (2010). *Stowage Planning of Large Containership with Tradeoff between Crane Workload Balance and Ship Stability*. Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2010 – Vol III. (2010). Disponible en [fecha de acceso el 15.10.2016] http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010_pp1537-1543.pdf
194. Fanslau, T. y A. Bortfeldt (2010). *A Tree Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. INFORMS Journal on Computing, vol 22(2), pp:222–235. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <https://www.fernuni-hagen.de/wirtschaftswissenschaft/download/beitraege/db426.pdf>
195. FLEXSIM (2016c). *Flexsim CT. Container Terminal Library*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem, UT 84097. Disponible en [fecha de acceso el 25-11-2016] <https://www.flexsim.com/company>.
196. FLEXTERM (2016a), *FLEXTERM: FLEXSIM Container terminal*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem, UT 84097. Disponible en [fecha de acceso el 25-11-2016]. <http://www.flexsim.com.mx/flexsim-ct-flexterm> y <http://www.flexterm.com/>
197. FLEXTERM (2016b). *FLEXTERM: Press Releases*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem, UT 84097. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]. <https://www.flexsim.com/es/flexsim-ct/>
198. Forsythe, G. E.; Malcolm, M. A.; y Moler, C. B. (1977). *Computer Methods for Mathematical Computations*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977. 270 Páginas. ISBN-10: 0131653326 / ISBN-13: 978-0131653320
199. Fosters, F. y A. Bortfeldt. (2012). *A tree search procedure for the container relocation problem*. Computers and Operations Research, vol 39 (2). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/220469692_A_tree_search_procedure_for_the_container_relocation_problem

-
200. Francis, R.L. y White, J.A. (1974). *Facility layout and allocation – An analytical Approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1974. 592 Páginas. BN-10: 0132992310 / ISBN-13: 978-0132992312
201. Frankel, E.; PWilmes, P.G. y Chelst. K.G. (1973). *Simulation of Multipurpose Port and Multiport Offshore Facilities*, Offshore Technology Conference, 29 de Abril - 2 de Mayo de 1973, Houston, Texas (USA). Publicado por Offshore Technology Conference (ISBN: 978-1-55563-659-3).
202. Frankel, E.; Golden. G. y Wilmes, P.G. (1974a). *Port Design and Analysis Methodology* Massachusetts Institute of Technology – Sea Grant Program. Report. MITSG 74-31 MIT IX 74-331-NT0 NOAA-75011403 (330 páginas).
203. Frankel, E.; Golden. G. y Wilmes, P.G. (1974b). *Appendix Port Design and Analysis Methodology*. Massachusetts Institute of Technology – Sea Grant Program. MITSG 74-31 MIT IX 74-331-NT0 NOAA-75011403 (148 páginas).
204. Frankel, E. (1987). *Port Planning and Development*. John Wiley & Sons Inc (30 de abril de 1987). 822 Páginas. ISBN-10: 0471837083 y ISBN-13: 978-0471837084
205. Gademann, A.J.R.M. y van de Velde S.L. *Positioning automated guided vehicles in a loop layout*. European Journal of Operational Research vol 127(3), pp: 565–573.
206. Gambardella, L.M.; Bontempi, G.; Taillard, E.; Romanengo, D.; Raso, G. y Piermari P. (1996). *Simulation and forecasting in intermodal container terminal*. Simulation in Industry, 8th European Simulation Symposium, Genoa, Italy (1996). Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2425555_Simulation_And_Forecasting_In_Intermodal_Container_Terminal
207. Gambardella, L.; Rizzoli, A. y Zaffalon, M. (1998). *Simulation and planning of an intermodal container terminal*. Simulation 71 (2), pp: 107–116. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://people.idsia.ch/~luca/tr-idsia-41-98.pdf>
208. Gambardella L. M. y Rizzoli A. E. (2000): *The role of simulation and optimization in intermodal container terminals*. Working paper, Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale, Manno-Lugano, Switzerland (2000). Disponible en [fecha de acceso el 15.09.2016] <http://www.idsia.ch/luca/abstracts/papers/ess2000.pdf>
209. Gambardella, L.M., Mastrolilli, M., Rizzoli A.E. y Zaffalon, M. (2001). *An optimization methodology for intermodal terminal management*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 12(5-6), pp: 521-534. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/200058865_An_optimization_methodology_for_intermodal_terminal_management
210. Gao, C.; Zhang, R.; Du, Y. y Chen, Q. (2010) *A proactive and reactive framework for berth allocation with uncertainties*. Advanced Management Science (ICAMS), 2010 IEEE International Conference vol. 3, pp: 144 –149. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/251946778_A_proactive_and_reactive_framework_for_berth_allocation_with_uncertainties
 211. García, A.; García, I.; y Pérez, J.L. (2006). *Modelo y análisis de un puerto seco mediante simulación*. X Congreso de Ingeniería de Organización. Valencia 7 y 8 de Septiembre de 2006. 7 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 02/11/2014] http://adigor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2006/gestion_produccion/000177_final.pdf
 212. Gehring, H., y Bortfeldt, A. (1997). *A Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. International Transactions in Operational Research vol 4(5/6), pp:401–418. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969601697000336> y http://www.econbiz.de/archiv/ha/fuha/winformatik/algorithm_container_problem.pdf
 213. Gehring, H. y Bortfeldt, A. (2002). *A Parallel Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. International Transactions in Operational Research, vol 9(4), pp:497–51. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 20.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/227625364_A_Parallel_Genetic_Algorithm_for_Solving_the_Container_Loading_Problem
 214. Gehring, H.; Bortfeldt, A. y Mack, D. (2003). *A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem*. Parallel Computing, vol 29(5), pp: 641–662. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167819103000474>
 215. George, J. A. y Robinson, D. F. (1980). *A Heuristic for Packing Boxes into a Container*. Computers and Operations Research, vol 7, pp: 147-156.
 216. Giallombardo, G.; Moccia, L.; Salani, M., y Vacca, I. (2008). *The tactical berth allocation problem with quay crane assignment and transshipment-related quadratic yard costs*. Proceedings of the European Transport Conference 2008 (ETC'08), pp: 1–27. (2008). Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] https://infoscience.epfl.ch/record/138850/files/CT_ETC_08.pdf

-
217. Giallombardo, G.; Moccia, L. y Salani, M. (2010). *Modeling and Solving the Tactical Berth Allocation Problem*. Transportation Research Part B Methodological, vol. 44(2), pp. 232-245. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261509000824>
218. Giemisch, P. y Jellinghaus, A. (2003). *Organization models for the containership stowage problem*. Annual international conference of the German Operations Research Society (OR 2003), (3–5 de Septiembre de 2003), Heidelberg, Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.5239&rep=rep1&type=pdf>
219. Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA. 1ª edition (11 de enero 1989) 432 páginas. ISBN-10: 0201157675 / ISBN-13: 978-0201157673.
220. Goodchild, A. V. y Daganzo, C. F. (2005). *Crane double cycling in container ports: Effect on Ship Dwell Time*”. Institute of Transportation Studies. University of California at Berkeley. Research report: UCB-ITS-RR-2005-5 ISSN 0192 4095 Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] <http://www.its.berkeley.edu/sites/default/files/publications/UCB/2005/RR/UCB-ITS-RR-2005-5.pdf>
221. Goodchild, A. V. y Daganzo, C. F. (2006). *Double-cycling strategies for container ships and their effect on ship loading and unloading operations*. Transportation Science. Volumen (40), pp: : 473–483. (2006).
222. Goodchild, A. V. y Daganzo, C. F. (2007). *Crane double cycling in container ports: planning methods and evaluation*. Transportation Research Part B Volumen 41, pp: 875–89. (2007).
223. Grunow, M.; Gunther, H.-O. y Lehmann, M. (2004). *Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals*. OR Spectrum, vol 26(2), pp: 211-235.
224. Gudelj, A.; Krčum, M. y Twrdy, E. (2010). *Models and methods for operations in port container terminals*. Promet – Traffic & Transportation, Vol. 22 (1); pp: 43-51. Disponible en [fecha de consulta 07/11/2017] <http://www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/163/70>
225. Guan, Y.; Xiao, W.-Q.; Cheung, R. K. y Li, C.-L. (2002). *A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis*. Operations Research Letters, Volumen 30(5), pp: 343-350. Disponible en [fecha de acceso el

- 27.01.2017]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637702001475?np=y&npKey=0fcfa03e6c5b95dfc9441634075b31530f56148bdf19b5788672ce1dbc5240fb>
226. Guan, Y., y Cheung, R. K. (2004). *The berth allocation problem: models and solution methods*. OR-Spektrum 26(1), pp: 75-92. Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-003-0140-8>
227. Guan, Y.; Yang, K.-H. y Zhou, S. (2013). *The crane scheduling problem: models and solution approaches*. Annals of Operations Research. Vol 203(19), pp: 119-139.
228. Günther, H. O. y Kim, K. H. (2006). *Container terminals and terminal operations*. OR Spectrum 28(4), pp: 437-445. DOI: 10.1007/s00291-006-0059-y. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26-10-2006]. https://www.researchgate.net/publication/226429109_Container_terminals_and_terminal_operations
229. Guo, X., y S.Y. Huang (2008). *Performing a search for yard crane dispatching in container terminals*. Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, pp: 263-267. DOI: 10.1145/1774088.1774583 · Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26-10-2006] https://www.researchgate.net/publication/221002015_A_two_stage_yard_crane_workload_partitioning_and_job_sequencing_algorithm_for_container_terminals
230. Guo X.; Huang, S. Y.; Hsu, W. J. y Low, M.Y.H. (2009a). *A simulation based hybrid algorithm for yard crane dispatching in container terminals*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin y R. G. Ingalls), pp: 2320-2331. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/221526453_A_Simulation_based_Hybrid_Algorithm_for_Yard_Crane_Dispatching_in_Container_Terminals
231. Guo X.; Huang, S. Y.; Hsu, W. J. y Low, M.Y.H. (2009b). *Simulation-based dynamic partitioning of yard crane workload for container terminal operations*. Proceedings of the 42nd Annual Spring Symposium (ANSS), San Diego, CA, USA, March, (2009). Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220953999_Simulation-Based_Dynamic_Partitioning_of_Yard_Crane_Workload_for_Container_Terminal_Operations
232. Guo, X. y Huang, S.H: (2010a). *A two stage yard crane workload partitioning and job sequencing algorithm for container terminals*. Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC), Sierre, Switzerland, March 22-26, 2010. 7 Páginas. DOI:

- 10.1145/1774088.1774583 Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/221002015_A_two_stage_yard_crane_workload_partitioning_and_job_sequencing_algorithm_for_container_terminals
233. Guo, X. y Huang, S.H: (2010b). *Deciding on planning windows by partitioning time for yard crane anagement in container terminals*.1st International Conference on Computational Logistics. 9 Páginas . Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/228420525_Deciding_on_planning_windows_by_partitioning_time_for_yard_crane_anagement_in_container_terminals
234. Guo, X.; Huang, S. Y.; Hsu, W. J. y Low, M. Y. H. (2011). *Dynamic yard crane dispatching in container terminals with predicted vehicle arrival information*. Advanced Engineering Informatics, vol 25(3), pp: 472-484. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/220371676_Dynamic_yard_crane_dispatching_in_container_terminals_with_predicted_vehicle_arrival_information
235. Guzzi, G.; Santillo, L. y Romano, E. (2013). *A new model to manage vessels flow in a Port Terminal*. Proceedings of the 7th International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling (ASM '13) Recent Advances in Mathematics pp:223-230 (ISBN: 978-1-61804-158-6; ISSN: 2227-4588. Disponible en [fecha de consulta el 07.02.2017]
en <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/CambridgeUSA/MATHECO/MATHECO-34.pdf>.
236. Ha, B.-H.; Park, E.-J. y Lee, C.-H. (2007). *A simulation model with low level f detail for container terminal and its applications*. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference. Editado por S. G. Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, J. D. Tew y R. R. Barton, pp: 2003-2011. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]
<http://www.informs-sim.org/wsc07papers/249.pdf>.
237. Haghani, A. y Kaiser, E. I. (2001). *A model for designing container loading plans for containerships*. Working paper, University of Maryland, presented at Transportation Research Board 2001 Annual Meeting. (2001).
238. Han X.; Lu Z. y Xi, L. (2010). *A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time*. European Journal of Operational Research 207 (2010). Disponible en [fecha última consulta 28.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/220288993_A_proactive_approach_for_simultaneous_berth_and_quay_crane_schedulingproblem_with_stochastic_handling_time
239. Hanafi, S.; Jesus, J. y Semet, F. (2003). *The container assignment problem: a case study on the port of Lille*. Working paper, University of Valenciennes, presented at Odysseus.

-
240. Hansen, P.; Oguz, C. y Mladenovic, N. (2008). *Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation*. European Journal of Operational Research, 191(3), 636-649. Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.057>.
241. Hartmann, S. (2003). *A general framework for scheduling equipment and manpower on container terminals*. OR Spectrum vol 26, pp: 51–74. Disponible en [fecha de acceso el 23.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-003-0149-z?no-access=true>
242. Hartmann, S. (2004). *Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics*, OR Spectrum 26 (2004), pp: 171–192. DOI: 10.1007/s00291-003-0150-6. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/226565430_Generating_Scenarios_for_Simulation_and_Optimization_of_Container_Terminal_Logistics
243. Hassan, S. A. (1993). *Port activity simulation: An overview*. Simulation Digest (ACM SIGSIM Simulation). Volumen 23 (2): 17-36. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/234806460_Port_activity_simulation_An_overview
244. Hayuth, Y.; Pollatschek, M.A. y Roll, Y. (1994). *Building a port simulator*. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International Volumen 63(3), pp: 179-189. DOI: 10.1177/003754979406300307. Disponible en [fecha de acceso el 20.12.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979406300307>
245. He, J.; Chang, D.; Mi, W. y Yan, W. (2010). *A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane scheduling*. Transportation Research Part E, Volumen 46, pp: 136–155. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554509000878>
246. He, J.-l.; Zhang, W.-M.; Huang Y.-f. y Yan, W (2013). *An efficient approach for solving yard crane scheduling in a container terminal*. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), October 2013, vol 18(5), pp: 606-619.
247. Henesey, L.E. (2002). *Enhancing terminal productivity through Artificial Intelligence: Multi-Agent System Approach*. Proceedings of the 26th Terminal Operators Conference (TOC-Europe 2002), Antwerp (Bélgica). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/267998305_Enhancing_terminal_productivity_through_Artificial_Intelligence_Multi-Agent_System_Approach.

248. Henesey, L. y Törnquist J. (2002). *Enemy at the gates: introduction of multi-agents in a terminal information community*. Proceedings of Ports and Marinas. Rhodos, Greece y publicado posteriormente en Water Studies Series vol 12; pp. 23-32 (2002) Disponible en [fecha de acceso el 17.01.2017] <http://www.bth.se/faculty/lhe/enemy%20at%20the%20gates/HeneseyTornquist.pdf>.
249. Henesey, L.E.; Wernstedt, F. y Davidsson, P. (2002). *A Market Based Approach to Container Port Terminal Management*. Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence, Workshop (ECAI 2002) - Agent Technologies in Logistics, Lyon (Francia). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2538809_A_Market-Based_Approach_to_Container_Port_Terminal_Management
250. Henesey, L. E. (2003). *More than just Piers: a multi-agent system in defining organization in a seaport terminal management system*. Proceedings of the 47th Annual Conference of the International Society for the Systems Sciences (ISSS) (Special Integration Group on Systems Applications to Business and Industry), Creta (Grecia). ISBN 0-974073504. (9 páginas). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/ISSS-2003/Final%20for%20ISSS-%202003.pdf>
251. Henesey, L. E., Notteboom, T., y Davidsson, P. (2003a). *Agent-based simulation of stakeholders relations: An approach to sustainable port and terminal management*. Proceedings of the International Association of Maritime Economists Annual Conference, Busan (Corea del Sur). 17 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/244452451_Agent-based_simulation_of_stakeholders_relations_An_approach_to_sustainable_port_terminal_management
252. Henesey, L. E.; Wernstedt, F. y Davidsson, P. (2003b). *Market Driven Control in Container Terminal Management*. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '03), Hamburgo (Alemania), pp: 377-386. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2832158_Market-Driven_Control_in_Container_Terminal_Management
253. Henesey, L. E., Davidsson, P., and Persson, J.A. (2004). *Using Simulation in Berth Planning at a Container Terminal*. Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT'04), Siguëenza (España) (9 -12 Mayo 2004), pp: 61-72. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/30499320_Using_Simulation_in_Evaluating_Berth_Allocation_at_a_Container_Terminal

-
254. Henesey, L. E. (2004a). *Enhancing Container Terminal Performance: A Multi Agent Systems Approach*. Department of Systems and Software Engineering. School of Engineering Blekinge Institute of Technology. Karlshamn, Sweden. Licentiate Series No 2004:06. 121 Páginas. ISSN 1650-2140 / ISBN 91-7295-040-4. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Lic.pdf>
255. Henesey, L. E. (2004b). *A Multi Agent Based Simulator for Managing a Container Terminal*. 2nd European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2004), 16 – 17 de diciembre de 2004, Barcelona (España). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/228772835_A_Multi_Agent_Based_Simulator_for_Managing_a_Container_Terminal
256. Henesey, L. E. (2006a). *A Simulation Model for Analysing Terminal Management Operations*. Proceeding of the 4th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '05), Hamburgo, Alemania. (8-11 Mayo 2006) Páginas 100-113. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Compit05/COMPIT2005%20Final.pdf>
257. Henesey, L.E. (2006b). *Multi-Agent Systems for Container Terminal Management*. Department of Systems and Software Engineering School of Engineering. Blekinge Institute of Technology (Sweden) Blekinge Institute of Technology Doctoral Dissertation Series (ISBN 978-91-7295-099-3). 295 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/phd.pdf>.
258. Henesey, L. E. y Persson, J.A. (2006). *Application of Transaction Costs In Analyzing Transport Corridors Using Multi-Agent-Based Simulation*. Promet Traffic & Transportation: Scientific Journal on Traffic and Transportation Research. Vol 18(2), pp: 59-65. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/666/520
259. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006a). *Agent Based Simulation Architecture for Evaluating Operational Policies in Transshipping Containers*. Fourth German Conference on Multiagent System Technologies (MATES 2006). LNAI Vol. 4196, pp. 73-85, K. Fischer and I. Timm (Eds), Springer-Verlag, Berlin y Heidelberg, Alemania. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/225651016_Agent_Based_Simulation_Architecture_for_Evaluating_Operational_Policies_in_Transshipping_Containers
260. Henesey, L. E.; Aslam, K. y Khurum, M. (2006b). *Task Coordination of Automated Guided Vehicles in a Container Terminal*. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '06), Oud Poelgeest, Leiden (Holanda), pp: 54-64. Disponible en [fecha de

- acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Compit06/COMPIT2006-Henesey%20final.pdf>
261. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006c). *Simulation of Operational Policies for Transshipment in a Container Terminal*. Proceedings of the 10th World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Multiconference on Circuits, Systems, Communications, and Computers, 13-15 Julio 2006, Atenas (Grecia), pp: 1289-1294. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/262278067_Simulation_of_operational_policies_for_transshipment_in_a_container_terminal
262. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006d). *Evaluating Container Terminal Transshipment Operational Policies: An Agent-Based Simulation Approach*. Journal WSEAS Transactions on Computers Volumen 5(9), pp: 2090-2098. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/242072279_Evaluating_Container_Terminal_Transshipment_Operational_Policies_An_Agent-Based_Simulation_Approach
263. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2007). *Comparison and evaluation of two automated guided vehicle systems in the transshipment of containers at a container terminal*. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, Leiden (Holanda), pp: 54-64. Publicado en Proceedings of the MODSIM World Conference 2007, Virginia Beach, Virginia (USA). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/271504686_Comparison_and_Evaluation_of_Two_Automated_Guided_Vehicle_Systems_in_the_Transshipment_of_Containers_at_a_Container_Terminal
264. Holguín-Veras, J. y Walton, C.M. (1995). *A Categorized and Annotated Bibliography to the Performance Analysis of Port Operations*. Interim Report SWUTC/95/721912-1. Southwest Region University Transportation Center - Center for Transportation Research - The University of Texas. Disponible en [fecha de acceso el 17.01.2017] en <http://library.ctr.utexas.edu/digitized/swutc/721912-1.pdf>.
265. Holguín-Veras, J. y Walton, C.M. (1996). *An Empirical Investigation of Alternative Approaches to the Simulation of Gantry Crane Operations*. Proceedings of the 38th Annual Meeting of Transportation Research Forum, Vol. 2, pp: 459-477. San Antonio, Texas (USA).
266. Holguín-Veras, J. y Jara-Díaz, S. (1999). *Optimal pricing for priority service and space allocation in container ports*. Transportation Research-B 33(2), pp: 81-106.

267. Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor. 1975. Reeditado en 1992 con ISBN: 9780262082136. 211 Páginas
268. Hoshino, S., J. Ota, A. Shinozaki, y H. Hashimoto (2005). *Highly efficient AGV transportation system management using agent cooperation and container storage planning*. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference Intelligence Robots and Systems, pp :1588-1593. Disponible en [fecha de acceso el 24.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/224623325_Highly_efficient_AGV_transportation_system_management_using_agent_cooperation_and_container_storage_planning
269. Howard, L.D.; Bragen M.J.; Burke, J.F. Jr. y Love, R.J. (2004):. *PORTSIM 5: A modeling from seaport level*. Mathematical and computer Modelling: Defense transportation: Algorithms, models, and applications for the 21st century. Vol 39 (6-8), pp: 715-731. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/245125186_PORTSIM_5_Modeling_from_a_seaport_level
270. Hsu, W.-K. W. y Chen J.Y. (1997). *The procurement and shipping policy of imported blending coals*. Recurso en red no publicado. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]. <http://web.idv.nkmu.edu.tw/~khsu/main/paper/conference/2004Shipping%20andProcurement.pdf>.
271. Hu, W.; Hu, Z.; Shi, L.; Luo, P. y Song, W. (2012). *Combinatorial Optimization and Strategy for Ship Stowage and Loading Schedule of Container Terminal*. Journal of computers, vol. 7, (8); pp- 2078-2092. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://www.jcomputers.us/vol7/jcp0708-35.pdf>
272. Imai, A. y Miki, T. (1989) *A heuristic algorithm with expected utility for an optimal sequence of loading containers into a containerized ship*. Journal of Japan Institute of Navigation, vol 80, pp. 117-124.
273. Imai, A.; Nishimura, E. y Papadimitriou, S. (2001). *The dynamic berth allocation problem for a container port*. Transportation Research Part B: Methodological. Volumen 35(4), 401-417. Disponible en [fecha de acceso el 27-01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261599000570>
274. Imai, A.; Nishimura, E., y Papadimitriou, S. (2003). *Berth allocation with service priority*. Transportation Research Part B: Methodological. Volumen 37(5), 437-457. Disponible en [fecha de acceso el 27-01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261502000231>

275. Imai, A.; Sun, X.; Nishimura, E. y Papadimitriou, S. (2005). *Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach*. Transportation Research Part B: Methodological, 39(3), 199-221. Disponible en [fecha de acceso el 27-01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261504000505>
276. Imai, A.; Nishimura, E.; Hattori, M. y Papadimitriou, S. (2007). *Berth allocation at indented berths for mega-containerships*. European Journal of Operational Research 179: 579–593. (2007). Disponible en [fecha de acceso el 15-10-2017] https://www.researchgate.net/publication/4754144_Berth_allocation_at_indented_berths_for_mega-containerships.
277. Imai, A.; Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2008a). *Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity*. Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review, 44(1), 136-151. Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136655450600041X>
278. Imai, A.; Chen, H.C.; Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2008b). *The Simultaneous Berth and Quay Crane Allocation Problem*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review 44(5), pp:900-920 (Septiembre 2008). DOI: 10.1016/j.tre.2007.03.003.
279. Imani, A; Nishimura, E.; Papadimitriou, S. y Sasaki, K. (2002). *The container loading problem*. International Journal of Maritime Economics, vol 4(2), pp: 126-14.
280. Imani, A; Sasaki, K.; Nishimura, E. y Papadimitriou, S. (2006). *Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks*. European Journal of Operational Research, vol 171(2), pp: 373–389.
281. INCONTROL (2017). *Incontrol Simulation Solutions..* INCONTROL Simulation Solutions. Utrecht (Holanda). Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://www.incontrolsim.com/company/>
282. Ingber, L. (1993). *Simulated annealing: Practice versus theory*. Journal of Mathematical and Computational Modeling 18(11):29–57. (1993). doi:10.1016/0895-7177(93)90204-C. Disponible en [fecha de acceso el 15.09.2017] http://ac.els-cdn.com/089571779390204C/1-s2.0-089571779390204C-main.pdf?_tid=042c8036-9c85-11e6-8e7e-00000aacb35f&acdnat=1477600759_737f3db21fc27dc68e729551be9f5ce3
283. Iris, C.; Pacino, D.; Ropke, S. y Larsen, A. (2015). *Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem: Set partitioning models and computational results*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review 81, pp: 75-

- 97 (Septiembre 2015). DOI: 10.1016/j.tre.2015.06.008. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/281169639_Integrated_Berth_Allocation_and_Quay_Crane_Assignment_Problem_Set_partitioning_models_and_computational_results
284. ISL (2015). *CHESSCON Virtual Terminal*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://www.downloads.isl-applications.com/CHESSCON-Virtual-Terminal.pdf>
285. ISL (2016a). *ISL Application References*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://www.chesscon.com/isl/References.html>
286. ISL (2016b). *CHESSCON: References*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.downloads.isl-applications.com/ISL-Applications-References.pdf>
287. ISL (2016c). *CHESSCON: Terminal View*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/TerminalView.html>
288. ISL (2016d). *CHESSCON: Capacity*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/Capacity.html>
289. ISL (2016e). *CHESSCON: Siulation*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/Simulation.html>
290. ISL (2016f). *CHESSCON: Virtual Terminal*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/VirtualTerminal.html>

291. ISL (2016g). *CHESSCON: Yard View*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/YardView.html>
292. ISL (2016h). *CHESSCON: Shift Preview*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/ShiftPreview.html>
293. Javanshir, H. y Seyedalizadeh, G.S.R. (2010). *Yard crane scheduling in port container terminals using genetic algorithm*. Journal of Industrial Engineering International. Vol 6 (11), pp: 39-50. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/200581107_Yard_crane_scheduling_in_port_container_terminals_using_genetic_algorithm
294. Jin, C.; Ren, Y.; Higuchi, Y. e Ito, H. (1999). *Optimum Design for Port Logistics System for Bulk Cargo with Fuzzy Set Theory*. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol.65-635, C (1999-7), pp 3010-3017 DOI: 10.1299/kikaic.65.3010. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/275490545_Optimum_Design_for_Port_Logistics_System_for_Bulk_Cargo_with_Fuzzy_Set_Theory
295. Jin, C. y Gao, P (2006). *Container Berth Expansion Planning with Dynamic Programming and Fuzzy Set Theory*” 2006 IEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI '06) pp. 260-265 (2006). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/251831648_Container_Berth_Expansion_Planning_with_Dynamic_Programming_and_Fuzzy_Set_Theory
296. John, B.; James J. y Rengaraj R.M. (2013). *Analysis and Optimization of Plant Layout using Relative Allocation of Facilities Technique*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering – Volume 3(8), pp: 514-520 (ISSN 2250-2459). Dispononible en [fecha de acceso el 21.01.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.413.5833&rep=rep1&type=pdf>
297. Joines, J.A. y Roberts. S.D. (2016). *Simulation Modeling with SIMIO: A Workbook – 4th Edition*. Publicado por Simio LLC y Amazon's CreateSpace. ISBN 13 978-1-51-9142207 / ISBN 10: 1-51-914220-X). 432 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.simio.com/publications/SMSWorkbook/index.php>

298. Jung, S. H. y Kim, K. H. (2006). *Load scheduling for multiple quay cranes in port container terminals*. Journal of Intelligent Manufacturing, volumen 17, pp: 479–492. doi:10.1007/s10845-005-0020-y. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10845-005-0020-y> y https://www.researchgate.net/publication/227294610_Load_scheduling_for_multiple_quay_cranes_in_port_container_terminals
299. Jung, D. H.; Park, Y.-M.; Lee, B. K.; Kim, K. H. y Ryu, K. R. (2006). *A quay crane scheduling method considering interference of yard cranes in container terminals*. MICAI 2006: Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science, 4293, pp: 461-471. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/11925231_43#page-1
300. Kaihara, T. (2003). *Multi-Agent Based Supply Chain Modelling with Dynamic Environment*. International Journal of Production Economics, Volumen 85(2), pp: 263-269. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/16374.pdf>
301. Kang J-G. y Kim, Y-D. (2002). *Stowage planning in maritime container transportation*. Journal of the Operational Research Society vol 53, pp: 415–426. (2002). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.jstor.org/stable/822825?seq=1#page_scan_tab_contents
302. Kang, J.; Ryu, K. R. y Kim, K. H. (2006). *Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information*. Journal of Intelligent Manufacturing. Vol 17(4), pp: 399-410. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10845-005-0013-x>
303. Kang, S.; Medina, J.C. y Ouyang, Y. (2008). *Optimal operations of transportation fleet for unloading activities at container ports*. Transportation Research B, 2008, vol 42(10), pp: 970-984. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261508000192>
304. Kao, C.; Chen, C.Y. y Lyu, J. (1993). *Determination of optimal shipping policy by inventory theory*. International Journal of Systems Science 24(7): 1265-1273. DOI: 10.1080/00207729308949558. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]. https://www.researchgate.net/publication/233312027_Determination_of_optimal_shipping_policy_by_inventory_theory
305. Karam, A.; Eltawil, A.; Mizutani, T. y Harraz, N. (2014). *Quay crane allocation problem with the internal truck capacity constraint in container terminals*. Proceedings of RIMS Workshop "Optimization Algorithms: theory, application and implementation", Research

- Institute of Mathematical Sciences, Kyoto University (Kyoto, Japón). Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/273575796_Quay_crane_allocation_problem_with_the_internal_truck_capacity_constraint_in_container_terminals
306. Kaveshgar, N.; Huynh, N. y Rahimian, S.K. (2012). *An efficient genetic algorithm for solving the quay crane scheduling problem*. Expert Systems with Applications 39(18), pp. 108-117. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/255821037_An_efficient_genetic_algorithm_for_solving_the_quay_crane_scheduling_problem
307. Kefi, M.; Ghedira, K.; Korbaa, O. y Yim, P. (2007). *Container Handling Using Multi-Agent Architecture*. Proceedings of the Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, First KES International Symposium, KES-AMSTA 2007, Wroclaw (Polonia), 31 Mayo - 1 Junio de 2007, pp: 685-693. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/221254885_Container_Handling_Using_Multi-agent_Architecture
308. Kelton, W.D.; Smith, J.S. y Sturrock D.T. y Verbraeck, A.: (2010): *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications 1ª Edition*. Publicado por Simio LLC (Copyrightc 2014). 378 páginas.
309. Kelton, W.D.; Smith, J.S. y Sturrock, D.T. (2013). *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications 3ª Edition*. Publicado por Simio LLC (Copyrightc 2014). 393 páginas.
310. Kelton, W.D., Sadowski, R. y Zupick, N. (2014). *Simulation with Arena, 6ª edition*. Ed. McGraw-Hill Professional (2014).ISBN-10: 0073401315; ISBN-13: 978-0073401317. 656 páginas.
311. Kelton W.D.; Smith J.S. y Sturrok, D.T. (2016). *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications*. 4ª Edición Publicado por Simio LLC y Amazon's CreateSpace. ISBN 13: 978-1-49-2116424 / ISBN 10 1-49-211642-4). 400 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.simio.com/publications/SMSWorkbook/index.php>
312. Kia, M.; Shayan, E. y Ghotb, F. (2002). *Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation*. Computer and Industrial Engineering, vol 42(2-4), pp: 533–540. Disponible en [fechad e último acceso el 24.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00051-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00051-7)

313. Kiani, M.; Sayaerh, J. y Nooramin S. (2010). *A simulation framework for optimizing truck congestions in maritime terminal*. Journal of Maritime Research, Vol III, No I, pp 55-70, 2010. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/viewFile/128/125>
314. Kim, K.Y. y Kim K.H. (1997): *A routing algorithm for a single transfer crane to load export containers onto a containership*. Computers & Industrial Engineering, vol 33 (3-4), pp: 673-676. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835297002192>
315. Kim, K.H. y Kim, H.B. (1998). *The optimal determination of the space requirement and the number of transfer cranes for import containers*. Computers & Industrial Engineering, vol 35 (3-4), pp: 427-430. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835298001259>
316. Kim, K. H. y Bae, J. W. (1998). *Re-marshaling export containers in port container terminals*. Computers and Industrial Engineering vol 35 (3-4), pp: 655-658. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083529800182X>
317. Kim, K.H., y Kim, K.Y. (1999a). *An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals*. Transportation Science, vol 33 (1), pp: 17-33. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220412927_An_Optimal_Routing_Algorithm_for_a_Transfer_Crane_in_Port_Container_Terminals
318. Kim, K.H. y Kim, H.B. (1999b): *Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals*. International Journal of Production Economics vol 59, pp:415-423. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527398000280>
319. Kim, K.H. y Bae, J.W. (1999). *A dispatching method for Automated Guided Vehicles to Minimize Delays of Containership Operations*. International Journal of Management Science, vol 5(1), pp: 1-25. Disponible en [fecha de acceso el 19.02.2017] http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1MSAQ_1999_v5n1_1
320. Kim, K. H.; Park, Y. M. y Ryu, K.-R. (2000). *Deriving decision rules to locate export containers in container yards*. European Journal of Operational Research, vol 124(1), 89-101. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799001162>

321. Kim, K.H. y Kim, H. (2002). *The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers*. *Transportation Research Part B: Methodological* 36(9), Pagina 821–835. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261501000339>.
322. Kim, K. H.; Wang, S. J.; Park, Y.-M.; Yang C.-H. y Bae, J. W. (2002). *A simulation study on operation rules for automated container yards*. *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Industrial Engineering*.
323. Kim, K.Y. y Kim, K.H. (2003) *Heuristic algorithms for routing yard-side equipment for minimizing loading times in container terminals*. *Naval Research Logistics* vol 50(5), pp: 498–514. Disponible bajo consulta en [fecha de acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/229888156_Heuristic_algorithms_for_routing_yard-side_equipment_for_minimizing_loading_times_in_container_terminals
324. Kim, K. H.; Lee, K. M. y Hwang, H., (2003). *Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals*. *International Journal of Production Economics*, vol 84(3), pp: 283-292. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527302004668>
325. Kim, K.H., y Moon, K. C. (2003). *Berth scheduling by simulated annealing*. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(6), 541-560. Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00027-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00027-9).
326. Kim K. H. y Park K. T. (2003): *A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers*. *European Journal of Operational Research* vol 148(1), pp: 92-101. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702003338>
327. Kim, K. H. y Bae, J. W. (2004). *A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals*. *Transportation Science*, vol 38(2), pp: 224-234. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1030.0082?journalCode=trsc>
328. Kim, K.H.; Kang, J.S. y Ryu, K.R. (2004). *A beam search algorithm for the load sequencing of outbound containers in port container terminals*. *OR Spectrum* vol 26, pp: 93–116. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-003-0148-0?no-access=true>
329. Kim, K.H. y Park, Y. M. (2004). *A crane scheduling method for port container terminals*. *European Journal of Operational Research*, 156(3), pp: 752-768. Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00133-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00133-4)

330. Kim, K. H. y Hong, G. P. (2006). *A heuristic rule for relocating blocks*. Computers and Operations Research, vol 33, pp: 940–954. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054804001959>
331. Kim, K.H.; Jeon, S.M. y Ryu, K.R. (2006). *Deadlock prevention for automated guided vehicles in automated container terminals*. OR Spectrum, Volumen 28(4); pp: 659–679. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-006-0055-2>
332. Kim, K. H. y Lee, J. S. (2006). *Satisfying constraints for locating export containers in port container terminals*. Lecture Notes in Computer Science 3982, pp: 564–573. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11751595_60
333. Kim, K.H.; Park, Y.-M. y Jinm, M.-J. (2008). *An optimal layout of container yards*. OR Spectrum vol 30 (4), pp: 675–695. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://rd.springer.com/article/10.1007/s00291-007-0111-6?no-access=true>
334. Kim, B.-I.; Koo, J. y Park, B. *A raw material storage yard allocation problem for a large-scale steelworks*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 41 (9), pp: 880–884. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://rd.springer.com/article/10.1007/s00170-008-1538-x?no-access=true>
335. Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D. y Vecchi, M.P. (1983). *Optimization by simulated annealing*. Science 220(4598), pp: 671–680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://science.sciencemag.org/content/220/4598/671>
336. Koch, D.B. (2007). *PortSim – A Port Security Simulation and Visualization Tool*. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge (USA). Proceedings of the 41st Annual IEEE Carnahal Conference on Security Technology (ICCST'2007). Ottawa, Ontario (Canada), 8-11 de Octubre de 2007. 8 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 27.09.2016] http://web.ornl.gov/~ko5/PortSim_Paper.pdf
337. Koenigsberg, E. y Lam. R. (1976). *Cyclic queue models of fleet operations*. Operations Research, 1976, vol 24 (3), pp: 516–529. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 27.09.2016] https://www.researchgate.net/publication/248743794_Cyclic_Queue_Models_of_Fleet_Operations
338. Koh, P.-H.; Goh, J. L.-K.; Ng, H.-S. y Ng, H.C. (1994a). *Using simulation to preview plans of a container port operations*. Proceeding of the 26th Winter Simulation Center (1994). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A: Sadowski y A.F. Seila, pp: 1109–

1115. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0162.pdf
339. Kondratowicz, L. J. (1990). *Simulation methodology for intermodal freight transportation terminals*. Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International Volumen 51 (1); pp: 49-59. (1990). DOI: 10.1177/003754979005500110. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/238834970_Simulation_methodology_for_intermodal_freight_transportation_terminals
340. Kondratowicz, L. J. (1992). *Methodological solutions for increased efficiency of modelling and simulation of seaports and inland freight terminals*. Maritime Policy Management 19 (2), pp: 157-64. 1992. DOI: 10.1080/03088839200000022. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/232864218_Methodological_solutions_for_increased_efficiency_of_modelling_and_simulation_of_seaports_and_inland_freight_terminals
341. Koo, P.-H.; Lee, W.S.; Jang, D.W. (2004) *Fleet sizing and vehicle routing for container transportation in a static environment*. Primera publicación en: OR Spectrum . Apr 2004, Vol. 26(2); pp: 193-209. y segunda publicación en: *Container Terminals and Automated Transport Systems* pp: 123-139 (2005)
342. Kordić, S.; Dragović, B.; Davidović, T. y Kovač, N. (2012). *A Combinatorial Algorithm for Berth Allocation Problem in Container Port*. Proceedings of International Association of Maritime Economists Conference, Taipei, 2012. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/272833290_A_Combinatorial_Algorithm_for_Berth_Allocation_Problem_in_Container_Port
343. Kordić, S.; Kovač, N. y Davidović, T. (2015). *Divide and conquer approach to discrete berth allocation problem*. Naval Academy Scientific Bulletin, Volume XVIII – 2015 – Issue 2, pp: 307-316. Publicado por Naval Academy Press, Constanta, Romania. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/285578942_Divide_and_Conquer_Approach_to_Discrete_Berth_Allocation_Problem
344. Kordić, S.; Dragović, B.; Davidović, T. y Kovač, N. (2016) *Combinatorial Approach to Exactly Solvig Discrete and Hybrid Berth Allocation Problem*. Applied Mathematical Modelling 40(21-22), pp: 8952-8973 (May 2016). Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017]

- https://www.researchgate.net/publication/303696390_Combinatorial_Approach_to_Exactly_Solving_Discrete_and_Hybrid_Berth_Allocation_Problem
345. Korsvik, J. E. y Fagerholt, K. (2010). *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling with flexible cargo quantities*. Journal of Heuristics 16(2), pp: 117-137. (2010). doi:10.1007/s10732-008-9092-0 Disponible bajo petición [fecha de acceso el 25.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/220403498_A_tabu_search_heuristic_for_ship_routing_and_scheduling_with_flexible_cargo_quantities
 346. Korsvik, J. E.; Fagerholt, K. y Laporte, G. (2010) *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling*. Journal of the Operational Research Society 61, pp: 594-603. (2010). DOI: 10.1057/jors.2008.192 Disponible bajo petición [fecha de acceso el 25.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/220636495_A_tabu_search_heuristic_for_ship_routing_and_scheduling
 347. Köse, E.; Başar, E.; Demirci, E.; Güneroğlu, A. y Erkebay, Ş. (2003). *Simulation of marine traffic in Istanbul Strait*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol 11, pp: 597-608. 2003. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/222369240_Simulation_of_marine_traffic_in_Istanbul_Strait
 348. Kozan, E. (1997a). *Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container Terminals*. Transport. Plan. Technol. Volumen 20 (3), pp:235–248. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03.11.2016]
https://www.researchgate.net/publication/239469041_Comparison_of_analytical_and_simulation_planning_models_of_seaport_container_terminals
 349. Kozan, E. y Preston, P. (1999). *Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals*. International Transactions of Operational Research, vol 6, pp: 311–329. (1999). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03.11.2016]
https://www.researchgate.net/publication/227890776_Genetic_algorithms_to_schedule_container_transfers_at_multimodal_terminals
 350. Kozan, E. (2000). *Optimising container transfers at multimodal terminals*. Mathematical and Computer modelling, vol 31, pp: 235-243. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016]
https://www.researchgate.net/publication/222586695_Optimising_container_transfers_at_multimodal_terminals
 351. Kozan, E. (2006). *Optimum capacity for intermodal container terminals*. Transportation Planning and Technology, Vol. 29(6), pp: 471-482. Disponible bajo petición en [fecha de

- acceso el 02.11.2016]
https://www.researchgate.net/publication/27480826_Optimum_Capacity_for_Intermodal_Container_Terminals
352. Kozan, E. y Preston, P. (2006). *Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals*. Operacional Research Spectrum, vol 28 (4), pp: 519–537 (2006). DOI: 10.1007/978-3-540-49550-5_5. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/27470508_Mathematical_modelling_of_container_transfers_and_storage_locations_at_seaport_terminals
353. Kruskal, J.B. (1959). *On the shortest spanning subtree and the traveling salesman problem*. Proceedings of the American Mathematical Society. Vol 7 (1956), pp. 48–50. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017]
http://www.jstor.org/stable/2033241?seq=1#page_scan_tab_contents
354. Kulak, O.; Polat, O. y Guenther, H.-O. (2008). *Performance Evaluation of Container Terminal Operations*. 3rd German - Korean Workshop on Container Terminal Management, University of Bremen, 27-31 Agosto 2008, Bremen, Alemania. 9 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016]
<http://opolat.pau.edu.tr/docs/Performance%20Evaluation%20of%20Container%20Terminal%20Operations.PDF>
355. Kumar, M. y Omkar, S.N. (2008). *Optimization of yard crane scheduling using particle swarm optimization with genetic algorithm operators (PSOGAO)*. Journal of Scientific & Industrial Research Volumen 67 (5), pp: 335-339. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017].
https://www.researchgate.net/publication/28604881_Optimization_of_yard_crane_scheduling_using_particle_swarm_optimization_with_genetic_algorithm_operators_PSOGAO
356. Lai, K.K. y Shih, K. (1992). *A study of container berth allocation*. Journal of Advanced Transportation. Volumen 26(1), pp: 45-60. Disponible en [fecha de acceso el 26.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/229801596_A_study_of_container_berth_allocation
357. Lai, K. K.; Lam, K., (1994). *A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong*. International Journal of Modeling & Simulation. Vol 14(3), pp: 134-138. Disponible en [fecha de acceso el 26.01.2017]
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02286203.1994.11760228>

358. Lai, K. K.; Leung, J. W., (1996). *Analysis of yard crane deployment strategies in a container terminal*. Proceedings of ICC & IE Conference, pp: 1187-1190.
359. Lajjam, A.; El Merouani, M.; Medouri, A. y Tabaa, Y. (2013). *Mathematical model for Quay Crane Scheduling Problem with spatial constraints*. International Journal of Innovation and Applied Studies 4(3), pp: 547-551 (Noviembre 2013) Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/258519667_Mathematical_model_for_Quay_Crane_Scheduling_Problem_with_spatial_constraints
360. Lalla-Ruiz, E.; Melian, B. y Moreno-Vega, J.M. (2012). *Artificial intelligence hybrid heuristic based on tabu search for the dynamic berth allocation problem*. Engineering Applications of Artificial Intelligence 25(6):1132-1141 (September 2012). DOI: 10.1016/j.engappai.2012.06.001. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/236236639_Artificial_intelligence_hybrid_heuristic_based_on_tabu_search_for_the_dynamic_berth_allocation_problem
361. Lam, S.-W.; Lee, L.-H. y Tang L.-C. (2007). *An approximate dynamic programming approach for the empty container allocation problem*. Transportation Research Part C 15 (2007) Páginas 265–277. Disponible en [fecha de última descarga 10.12.2016] https://www.researchgate.net/publication/222816130_An_approximate_dynamic_programming_approach_for_the_empty_container_allocation_problem
362. Land, A:H. y Doig, A:G. (1960). *An automatic method of solving discrete programming problems*. Econometrica. 28 (3). pp. 497–520. doi:10.2307/1910129.
363. Lau, H. y Zhao, Y. (2008): *Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals*. Annals of Operations Research March 2008, vol 159(1), pp: 373-394. Disponible en [fecha de acceso el 12.12.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552730700237X>
364. Lee, T.-W.; Park, N.-K. y Lee, D.-W. (2003). *A simulation study for the logistics planning of a container terminal in view of SCM*. Maritime Policy & Management, Vol. 30(3), pp: 243-254, 2003. Disponible bajo petición en (fecha de acceso el 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/248989141_A_Simulation_Study_for_the_Logistics_Planning_of_a_Container_Terminal_in_View_of_SCM
365. Lee, L.H., E.P. Chew, K.C. Tan y Y.B. Han. (2006). *An optimization model for storage yard management in transshipment hubs*. OR Spectrum. Volumen 28(4), pp: 539-561. Disponible en [fecha de acceso el 14.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-006-0045-4>

366. Lee, D.-H.; Cao, Z. y Meng, Q. (2007). *Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm*. International Journal of Production Economics. vol 107(1). pp (115–124). Disponible en [fecha de acceso el 14.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527306002155>
367. Lee, S.-Y. y Cho, G.S. (2007). *A Simulation Study for the Operations Analysis of Dynamic Planning in Container Terminals Considering RTLS*. Proceedings of the Innovative Computing, Information and Control, International 2007 (ICICIC'2007) (5-7 Septiembre 2007), pp. 116, ISBN: 0-7695-2882-1. doi:10.1109/ICICIC.2007.89. Disponible en [fecha de acceso el 14.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/4310238_A_Simulation_Study_for_the_Operations_Analysis_of_Dynamic_Planning_in_Container_Terminals_Considering_RTLS
368. Lee, Y. y Hsu, N.-Y. (2007). *An optimization model for the container pre-marshalling problem*. Computers and Operations Research, vol 34(11), pp: 3295-3313. Disponible en [fecha de acceso el 14.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505480500403X>
369. Lee, D.H., Wang, H., y Miao, L. (2008). *Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. Volumen 44(1), pp: 124–135 (2008). Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222539986_Quay_crane_scheduling_with_no_n-interference_constraints_in_port_container_terminals
370. Lee, Y. y Chao, S.-L. (2009). *A neighborhood search heuristic for pre-marshalling export containers*. European Journal of Operational Research, vol 196(2), pp: 468-475. Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221708002865>
371. Lee, Y. y Chen, C.-Y. (2009). *An optimization heuristic for the berth scheduling problem*. European Journal of Operational Research, 196(2), 500-508. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.021>.
372. Lee, D.H.; Cao, J. X.; Shi, Q. y Chen, J. H. (2009a). *A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 45. pp. 810-820. (2009). DOI: 10.1016/j.tre.2009.04.008 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 14.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222979300_A_heuristic_algorithm_for_yard_truck_scheduling_and_storage_allocation_problems

373. Lee, N; Lau, H. y Ko, A. (2009b). *An Immune Inspired Algorithm for Solving Dynamic Vehicle Dispatching Problem in a Port Container Terminal*. Proceedings Artificial Immune Systems, 8th International Conference, ICARIS 2009, York, UK, August 9-12, 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-03246-2_30 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 14.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/221506753_An_Immune_Inspired_Algorithm_for_Solving_Dynamic_Vehicle_Dispatching_Problem_in_a_Port_Container_Terminal
374. Lee, Y. y Lee, Y.-J. (2010). *A heuristic for retrieving containers from a yard*. Computers and Operations Research. vol. 37(6), pp: 1139-1147. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809002433>
375. Lee, D.H.; Jin, J.G: y Chen, J.H. (2011). *Integrated Bay Allocation and Yard Crane Scheduling Problem for Transshipment Containers*. Marine Transportation and Marine Terminal Operations Volume 2222 (2011), pp: 63-71. Disponible en [fecha de acceso el 14.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/259572416_Integrated_Bay_Allocation_and_Yard_Crane_Scheduling_Problem_for_Transshipment_Containers
376. Lee, D.H.; Jin, J.G: y Chen, J.H. (2012). *Terminal and yard allocation problem for a container transshipment hub with multiple terminals*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review · Marzo 2012. DOI: 10.1016/j.tre.2011.09.004. Disponible en [fecha de acceso el 14/10/2016]
https://www.researchgate.net/publication/251670898_Terminal_and_yard_allocation_problem_for_a_container_transshipment_hub_with_multiple_terminals
377. Legato P. y Mazza, R. (2001). *Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation*. European Journal Operational Research 133 (3), pp: 537-547. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]
[http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00200-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00200-9)
378. Legato, P. y Rina, R. M. (2001). *Berthing planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation*. European Journal of Operational Research, 133(3), pp: 537-547. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221700002009>
379. Legato, P. y Monaco, MF- (2004). *Human resources management at a marine container terminal*. European Journal of Operational Research vol 156(3), pp: 769-781 DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00134-6 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/4871597_Human_resources_management_at_a_marine_container_terminal

-
380. Legato, P.; Mazza, R.M. y Trunfio, R. (2008). *Simulation-based optimization for the quay crane scheduling problem*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, pp: 2717-2725. (2008) Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc08papers/342.pdf>
381. Legato, P.; Canonaco, P. y Mazza, R.M. (2009). *Yard Crane Management by Simulation and Optimisation*. Maritime Economics & Logistics 11(1): 36-57 (March 2009). DOI: 10.1057/mel.2008.23. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/24110600_Yard_Crane_Management_by_Simulation_and_Optimisation
382. Legato, P.; Trunfio, R. y Meisel, F. (2011). *Modeling and solving rich quay crane scheduling problems*. Computers & Operations Research, Volumen 39, Pp: 2063–2078. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811002875>
383. Leung, S. C. H.; Lai, K. K. y Wu, Y. (2003). *Stochastic Model for Dynamic Empty Container Allocations*. Proceedings of the IEMS, Vol. 2(2), pp: 113-120.
384. Lehmann, M.; Grunow, M. y Günther, H.-O. (2006). *Deadlock handling for real-time control of agvs at automated container terminals*. OR Spectrum, 28(4), pp: 631–657. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-006-0053-4>
385. Li, C.-L. y Vairaktarakis, G. L. (2001). *Loading and unloading operations in container terminals*. Technical Memorandum 745, Case Western Reserve University, Weatherhead School of Management, Department of Operations, (2001). Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2016] <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/1831/1/39%20Final-Version.pdf>.
386. Li, C.-L. y Vairaktarakis, G. L. (2004). *Loading and unloading operations in container terminals*. IIE Transactions, vol 36(4). Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2016] https://www.researchgate.net/publication/47870170_Loading_and_unloading_operations_in_container_terminals
387. Li, B. y Li, W.-f. (2010). *Modelling and Simulation of Container Terminal Logistics systems using Harvard Architecture and Agent-Based Computing*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Huan, and E. Yücesan, eds, pp: 3396-3410 (2010). Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/314.pdf>

388. Li, Q.; Udding, J. T. y Pogromsky, A. Y. (2010b). *Modeling and control of the AGV system in an automated container terminal*. In Proc. of AsiaMIC 2010, Phuket (Tailandia). Disponible en [fecha de acceso el 19.02.2017] <http://w3.wtb.tue.nl/en/people>.
389. Li, W.; Goh, M.; Wu, Y.; Petering, M. E. H.; de Souza, R., y Wu, Y. C. (2012). *A continuous time model for multiple yard crane scheduling with last minute job arrivals*. International Journal of Production Economics, vol 136(2), pp: 332-343. Disponible en [fecha de acceso el 19.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311005366>
390. Liang, C., Huang, Y. y Yang, Y. (2009). *A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning*. Compututer Industrial Engineering vol. 56(3), pp. 1021–1028. Disponible en [fecha de acceso el 30.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835208002039?np=y&npKey=afcbbafdc253f20933f23a5f533f6a993be2a40e01e0b268d97f1855b5423411>
391. Liggett R.S. (2000). *Automated facilities layout: past, present and future*. Automation in Construction, vol 9(2000). Elsevier Science. Disponible en [fecha de acceso el 30.01.2017] <http://users.metu.edu.tr/baykan/arch467/Liggett00.pdf>
392. Lim, A. (1998). *The berth planning problem*. Operations Research Letters, 22(2), 105-110 Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637798000108>
393. Lim, A. (1999). *An effective ship berthing algorithm*. Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99). Volumen 1, pp: 594-599. D. Thomas Ed. (San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers). Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220812073_An_Effective_Ship_Berthing_Algorithm.
394. Lim, A.; Rodrigues, B.; Xiao, F. y Zhu, Y. (2002a). *Crane Scheduling Using Tabu Search*. Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2002), 4-6 November 2002, Washington, DC, USA. DOI: 10.1109/TAI.2002.1180799. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/221417752_Crane_Scheduling_Using_Tabu_Search
395. Lim, A.; Rodrigues, B. y Zhu, Y. (2002b). *Crane scheduling using SWO with local search*. Proceedings of 4th Asia-Pac Conference on Simulated Evolution and Learning (SEAL 2002, Singapore), pp: 647-651.

396. Lim, J.K.; Kim, K.H.; Yoshimoto, K y Lee, J.H (2003). *A dispatching method for automated guided vehicles by using a bidding concept*. OR Spectrum vol 25, pp: 25–44. Disponible en [fecha de acceso el 26.01.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-26686-0_14
397. Lim, A.; Rodrigues, B.; Xiao, F. y Zhu, Y. (2004a). *Crane scheduling with spatial constraints*. Naval Research Logistics. Volumen 51, pp: 386–406. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/2925843_Crane_Scheduling_with_Spatial_Constraints?ev=prf_pub
398. Lim, A.; Rodrigues, B. y Zhou, X. (2004b). *Solving the Crane Scheduling Problem Using Intelligent Search Schemes*. Lecture Notes in Computer Science 3258, pp: 747-751 (September 2004). DOI: 10.1007/978-3-540-30201-8_59 y Proceedings 10th International Conference on Practice of Constraint Programming (CP 2004, Toronto, Canada) (27 Septiembre – 1 October 2004) Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/221632962_Solving_the_Crane_Scheduling_Problem_Using_Intelligent_Search_Schemes
399. Lim, A.; Rodrigues, B. y Zhou, X. (2004c). *Approximation Schemes for the Crane Scheduling Problem*. Proceedings of Algorithm Theory - SWAT 2004, 9th Scandinavian Workshop on Algorithm Theory (Humblebaek, Dinamarca, 8-10, Julio 2004). DOI: 10.1007/978-3-540-27810-8_28. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/221209348_Approximation_Schemes_for_the_Crane_Scheduling_Problem.
400. Lin, W. (2000): *On dynamic crane deployment in container terminals*. Master of philosophy in industrial engineering and engineering management, University of Science and Technology. (2000) y posteriormente publicado en IIE Transactions vol 35(2). Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/35742960_On_dynamic_crane_deployment_in_container_terminals
401. Linn, R.J. y C.Q. Zhang. (2003). *A heuristic for dynamic yard crane deployment in a container terminal*. IIE Transactions vol 35(2), pp:161-174. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/292103731_A_heuristic_for_dynamic_yard_crane_deployment_in_a_container_terminal
402. Liu, C.-M. y Sherali, H.D. (2000). *A coal shipping and blending problem for an electric utility company*. Omega, vol. 28(4): 433–444. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048399000675>

-
403. Liu, C.I.; Jula, H. y Ioannou, P. (2002). *Design, simulation, and evaluation of automated container terminals*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems vol 3(1), pp: 12–26. Disponible en [fecha de acceso el 28.11.2016] <http://www-bcf.usc.edu/~ioannou/2003update/d68.pdf>
404. Liu, C. I.; Jula, H.; Vukadinovic, K. y Ioannou, P. (2004). *Automated guided vehicle system for two container yard layouts*. Transportation Research Part C 12(5), pp: 349–368. Disponible en [fecha de acceso el 28.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2004.07.014>
405. Liu, J.; Wan, Y.-W. y Wang, L. (2006). *Quay Crane Scheduling at Container Terminals To Minimize the Maximum Relative Tardiness of Vessel Departures*. Naval Research Logistics 53, pp: 60–74 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 28.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/230269830_Quay_crane_scheduling_at_container_terminals_to_minimize_the_maximum_relative_tardiness_of_vessel_departures
406. Liu, M. y Dong, M. (2008). *The Simulation Technology of Port Container Logistics System on Flexsim*. ASCE Conference Proceeding 330: pp 2547–2552. doi:10.1061/40996(330)376. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 28.11.2016] [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40996\(330\)376](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40996(330)376)
407. Liu, Y. y Takakuwa, S. (2011). *Modelling the material handling in a container terminal using electronic real-time tracking data*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Editado por Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, y M. Fu, pp: 1596-1604 Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc11papers/142.pdf>
408. Loh, S.N. (1996). *The Quadratic assignment problem and its generalization to the berth allocation problem*. Honours Years Project Report, DISCS, NUS
409. Luan, W.; Chen, H. y Wang, Y. (2010). *Simulating Mechanism of Interaction Between Ports and Cities Based on System Dynamics: A Case of Dalian, China*. Chinese Geography Society 2010, vol 20(5), pp: 398-405 (DOI: 10.1007/s11769-010-0413-5. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://egeoscienc.neigae.ac.cn/fileup/PDF/20100915.pdf>
410. Ma, H.L.; Chan, F.T.S.; Chung, S.H. y Wong, C. S. (2012). *Berth Allocation Planning for Improving Container Terminal Performance*. Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (Estambul, Turquía, 3 de julio de 2012), pp:502-508 Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://www.iieom.org/iieom2012/pdfs/121.pdf>

411. Mack, D.; A. Bortfeldt y H. Gehring. (2004). *A Parallel Hybrid Local Search Algorithm for the Container Loading Problem*. International Transactions in Operational Research. Vol 11(5), pp: 511–533. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-3995.2004.00474.x/abstract>
412. Madachy, R.; Haas, B.; Bradbury, H.; Newell, J.; Rahimi, M.; Vos, R. y Wolch, J. (2008). *Achieving sustainable development in southern California: Collaborative Learning through System Dynamics Modelling*. 18th Annual Symposium of International Council of Systems Engineering. Holanda (June 18). Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] http://urbansustainability.snre.umich.edu/wp-content/uploads/2014/08/2008_Madachy-et-al_Achieving-sustainable-development-in-southern-California.pdf.
413. Maione, G. y Ottomanelli, M. (2005). *A petri net model for simulation of container terminals operations*. Advanced OR and AI methods in transportation, Poznan University of Technology, pp. 373–378. (2005) Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID58.pdf>
414. Mak, K.L. y Sun, D. (2009). *A new hybrid genetic algorithm and Tabu Search Method for yard cranes scheduling with inter-crane interference*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, Volumen 1, pp: 526-531 (2009). Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp526-531.pdf
415. Marin, F.; Garcia, I.; Ortiz, A. y Arreche, L.M. (2004). *Gantry crane operations to transfer containers between trains: A simulation study of a Spanish terminal*, Transportation Planning and Technology, Vol. 27, No. 4, (2004) Páginas 261-284, 2004. Disponible en (fecha de último consulta el 12.12.2016) https://www.researchgate.net/publication/245313568_Gantry_crane_operations_to_transfer_containers_between_trains_A_simulation_study_of_a_Spanish_terminal
416. Martinssen, D.; Steenken, D.; Wölfer, F.; Reiners, T. y Vos, S. (2001). *Einsatz bioanaloger Verfahren bei der Optimierung des wasserseitigen Containerumschlags*. Sebastian H, Grünert T (eds) Logistik management - supply chain management und e-business, pp 377-388. Teubner, Stuttgart. DOI: 10.1007/978-3-322-87181-7_31. Disponible bajo petición [fecha de acceso el 15.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/242070869_Einsatz_Bioanaloger_Verfahren_bei_der_Optimierung_des_Wasserseitigen_Containerumschlags
417. Mastrolilli, M.; Fornara, N.; Gambardella, L. M; Rizzoli, A. E. y Zaffalon, M, (1998). *Simulation for policy evaluation, planning and decision support in an intermodal container terminal*. Proceedings of the International Workshop 'Modeling and Simulation within a Maritime Environment', Editado por Y. Merkuryev, A. Bruzzone y L. Novitsky

- Society for Computer Simulation International, Riga, Latvia, (1998). Sep 6-8, pp: 33-38. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2608020_Simulation_For_Policy_Evaluation_Planning_And_Decision_Support_In_An_Intermodal_Container_Terminal.
418. Mauri, G. R.; Oliveira, A. C. M. y Lorena, L. A. N. (2008). *A hybrid column generation approach for the berth allocation problem*. En J. van Hemert & C. Cotta (Eds.), 8th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimisation – EvoCOP 2008 (Lecture Notes in Computer Science, 4972, pp. 110-122). Berlin: Springer. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] http://www.lac.inpe.br/~lorena/mauri/bap_ptalp_evocop.pdf
419. Meersmans, P.J.M. y Dekker, R. (2001). *Operations research supports container handling*. Econometric Institute Report 234, Erasmus University Rotterdam. 22 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016] <repub.eur.nl/pub/1689/feweco20011102151222.pdf>.
420. Mersmans P.J.M. y Wagelmans A.P.M. (2001a). *Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals*. Technical Report EI 2001-19, Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute, (2001). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDcQFjAA&url=http%3A%2F%2Frepub.eur.nl%2Fpub%2F95%2Fferimrs20010608163434.pdf&ei=Iw6-UpDRCMKU0AX6oYGgCg&usg=AFQjCNE1FpkjYKAj-PwdPtgHwA4TBNCq3A&sig2=6D8zr1N09ODSvF-wpnuXQQ>
421. Meersmans P.J.M. y Wagelmans A.P.M. (2001b). *Dynamic scheduling of handling equipment at automated container terminals*. Technical Report EI 2001-33, Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute, ERIM Report Series Reference No. ERS-2001-69-LIS (2001). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CEMQFjAB&url=http%3A%2F%2Frepub.eur.nl%2Fpub%2F137%2Fferimrs20011213173918.pdf&ei=FRC-UqPECarO0wW4q4CoDw&usg=AFQjCNEOOry2uA4KKTpME1CJ6AmFIMIHSg&sig2=WJlKN7swJ4pTHU62JxqdcQ&bvm=bv.58187178,d.bGQ>
422. Meersmans, P.J.M. (2002). *Optimization of Container Handling Systems*" Ph.D. Thesis, Tinbergen Institute 271, Erasmus, University Rotterdam (2002). Disponible en [fecha de acceso el 15.10.2016] <http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDcQFjAA&url=http%3A%2F%2Frepub.eur.nl%2Fpub%2F1855%2Ffewdis20020313164327>.

- [pdf&ei=tRC-UrejNoWe0QXc0YHQDg&usg=AFQjCNHgJDoE-PTYUekuHcMIqCNgjK92Gw&sig2=jZyKtDNl8m7I1bN5_26NHg&bvm=bv.58187178,d.Yms](#)
423. Meisel, F. y Bierwirth, C. (2006). *Integration of berth allocation and crane assignment to improve there source utilization at a seaport container terminal*. Operations Research Proceedings 2005. Springer, Berlin, pp: 105–110. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/221563377_Integration_of_Berth_Allocation_and_Crane_Assignment_to_Improve_the_Resource_Utilization_at_a_Seaport_Container_Terminal
424. Meisel, F. y Bierwirth, C. (2009). *Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem*. Transportation Research Part E 45 pp.196–209. (2009). DOI: 10.1016/j.tre.2008.03.001. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/227427257_Heuristics_for_the_integration_of_crane_productivity_in_the_berth_allocation_problem.
425. Meisel, F. y Bierwirth, C. (2011). *A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms*. Computers & Operations Research, Volumen 38, pp: 683–693. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810001632>
426. Meller, R.D. y Gau, K.-Y. (1996). *The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives*. Journal of Manufacturing Systems. Volumen 15 (5), pp: 351–366. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0278612596841987>
427. Mennis, E.; Platis, A.; Lagoudis, I.N. y Nikitakos, N. (2008). *Improving port container terminal efficiency with the use of Markov theory*. Maritime Economics & Logistics, vol 10(3), pp: 243–257. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1057/mel.2008.3?no-access=true>
428. Merkuryev, Y.; Tolujew, J.; Blümel, E.; Novitsky, L.; Ginters, E.; Viktorova, E.; Merkuryeva, G. y Pronins, J. (1998). *A modelling and simulation methodology for managing the Riga harbor container terminal* Simulation: : Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, Vol. 71, No. 2, pp: 84-95, 1998. DOI: 10.1177/003754979807100203. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220165111_A_Modelling_and_Simulation_Methodology_for_Managing_the_Riga_Harbour_Container_Terminal

429. Merkuryeva, G.; Merkuryev, Y. y Tolujev J. (2000). *Computer simulation and metamodelling of logistics processes at a container terminal*. Studies in Informatics and Control. 9(1). 10 Páginas. Editado por ICI Publishing House. ISSN 1220-1766 (Print) y ISSN 1841-429X (online).
430. Michalewicz, Z. (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer -Verlag, Berlin Heidelberg. Consultada 3ª Edición revisada y extendida (1998). (2ª Edición 1996). 387 Páginas. ISBN-10: 3540606769 / ISBN-13: 978-3540606765.
431. Moccia, L.; Cordeau, J. F.; Gaudioso, M. y Laporte, G. (2006). *A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal*. Naval Research Logistics Volumen 53, pp: 45–59. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://neumann.hec.ca/chairedistributique/common/cs.pdf>
432. Monaco, M. F. y Sammarra, M. (2007). *The berth allocation problem: a strong formulation solved by a Lagrangean approach*. Transportation Science, 41(2), 265-280. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220413281_The_Berth_Allocation_Problem_A_Strong_Formulation_Solved_by_a_Lagrangean_Approach.
433. Moorthy R.L. y Hock-Guan W. (2000). *Deadlock prediction and avoidance in an AGV system*. Master of Science, Sri Ramakrishna Engineering College, National University of Singapore. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/2358716_Deadlock_Prediction_And_Avoidance_In_An_AGV_System
434. Moorthy R.L.; Hock-Guan W.; Wing-Cheong, N. y Chung-Piaw, T. (2003). *Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone-controlled AGV system*. International Journal of Production Economics, vol 83(3), pp: 309–324. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527302003705>
435. Moorthy, R.L. y Teo, C.-P. (2006). *Berth management in container terminal: the template design problem*. OR-Spektrum, 28(4), 495-518. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-006-0036-5>
436. Moura, A. y Oliveira, J.F. (2005). *A GRASP approach to the Container-Loading Problem*. IEEE Intelligent Systems, vol 20(4), pp: 50-57. Disponible en [fecha de acceso el 23-08-2016] <https://www.computer.org/csdl/mags/ex/2005/04/x4050.html>
437. Moura, A.; Oliveira, J. y Pimentel, C. (2013). *A Mathematical Model for the Container Stowage and Ship Routing Problem*. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research, vol 12(3), pp: 217-231. (2013). Disponible bajo petición en

- [fecha de acceso el 23-08-2016]
https://www.researchgate.net/publication/257582120_A_Mathematical_Model_for_the_Container_Stowage_and_Ship_Routing_Problem
438. Moussi, R.; Ndiaye, N.F. y Yassine, A. (2012a). *Genetic Algorithm and new modelling to solve container location problem in Port*. The International Maritime Transport and Logistics Conference: A Vision For Future Integration). 18-20 Diciembre 2011. 14 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://marlog-aast.org/2011/docs/papers/S.3.4.pdf>
439. Moussi, R. ; Ndiaye, N.F. y Yassine, A. (2012b). *Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm (HGSAA) to Solve Storage Container Problem in Port*. Intelligent Information and Database Systems. Lecture Notes in Computer Science Volume 7197, 2012, pp 301-310 (2012). Publicado en Proceedings of the 4th Asian conference on Intelligent Information and Database Systems - Volume Part II (Marzo 2012). DOI: 10.1007/978-3-642-28490-8_32 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 23-08-2016] https://www.researchgate.net/publication/262205686_Hybrid_Genetic_Simulated_Annealing_Algorithm_HGSAA_to_Solve_Storage_Container_Problem_in_Port?ev=auth_publication_detail
440. Moussi, R. ; Euch, J.; Yassine, A. y Ndiaye, N.F. (2015). *A hybrid ant colony and simulated annealing algorithm to solve the container stacking problem at seaport terminal*. Pendiente de publicación en International Journal of Operational Research X, No. Y(4):0-October 2015 DOI: 10.1504/IJOR.2015.072723 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 23-08-2016] https://www.researchgate.net/publication/272506882_A_hybrid_ant_colony_and_simulated_annealing_algorithm_to_solve_the_container_stacking_problem_at_seaport_terminal
441. Munitic, A.; Tonko, B.; Dusan, R. y Slavko, S. (1990). *Computer simulation of shipbuilding production process management*. Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society. (1990), pp: 812-825. Disponible en [fecha de acceso el 23.11.2016] <http://www.systemdynamics.org/conferences/1990/proceed/pdfs/muniti812.pdf>
442. Murty, K.G.; Liu, J.; Wan, Y.-w.; Zhang, C.; Tsang, M. y Linn, R. (2000). *DSS (decision support systems) for operations in a container shipping terminal*. Proceedings of the First Gulf Conference on Decision Support Systems, Kuwait, 6–8 Noviembre, 2000, pp: 189–208. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www-personal.umich.edu/~murty/kuwait4.pdf>

443. Munisamy, S. (2010). *Timber terminal capacity planning through queuing theory*. Maritime Economics & Logistics, Volumen 12 (Junio - 2010), pp: 147-161. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/46525823_Timber_terminal_capacity_planning_through_queuing_theory
444. Mustafee, N. y Bischoff, E.E. (2011). *A multi-methodology agent-based approach for Container Loading*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Editado por S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, y M. Fu, pp: 234 – 245. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/254050333_A_multi-methodology_agent-based_approach_for_Container_Loading
445. Na, L. y Zhihong, J. (2009). *Optimization of Continuous Berth and Quay Crane Allocation Problem in Seaport Container Terminal*. Proceedings 2nd Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA '09. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.522. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/232643864_Optimization_of_Continuous_Berth_and_Quay_Crane_Allocation_Problem_in_Seaport_Container_Terminal
446. Nam, K.C.; Kwak, K.S. y Yu, M.S. (2002). *Simulation study of container terminal performance* Journal of Waterway Port Coastal Ocean Engineering 128 (2002), pp: 126–132. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-950X%282002%29128%3A3%28126%29?journalCode=jwped5>
447. Narasimhan, A., y Palekar, U.S. (2002). *Analysis and algorithm for the transtainer routing problem in container port operation*. Transportation Science, vol 36 (1), pp: 63–78. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.36.1.63.576?journalCode=trsc>
448. Nevins, M.R.; Macal, C.M. y Joines, J. (1995) *PORTSIM: An object-oriented port simulation*. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, Ottawa (Canada) (24-26 de Julio de 1995). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.osti.gov/scitech/biblio/95513>
449. Nevins, M. R.; Macal, C. M.; Love, R. y Brogen, M. J. (1998a). *Simulation, animation and visualization of seaport operations*. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International Volumen 71(2), pp: 96-106. DOI: 10.1177/003754979807100204. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979807100204>

450. Nevins, M. R.; Macal, y Joines, J.C (1998b): "A *discrete-event simulation model for seaport operations*". SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. Volumen 70(4), pp: 96-106. DOI: 10.1177/003754979807000401 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979807000401>
451. Ning, Z. y Weijian, M. (2009). *A Model for the Stowage Planning of 40 Feet Containers at Container Terminals*. International Journal of Information Systems for logistics and Management, vol 4 (2), pp: 41.49. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.603.7770&rep=rep1&type=pdf>
452. Ng, W.C. (2005). *Crane scheduling in container yards with intercrane interference*. European Journal of Operational Research Volumen 164 (1), pp: 64–78. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221703009251>
453. Ng, W.C. y Tsang, W.S. (2005). *Scheduling yard crane in a port container terminal using genetic algorithm*. The 1st International Conference on Transportation Logistics (T-Log 2005), 27-29 July 2005; Singapore.
454. Ng, W.C. y Mak, K.L. (2005a). *Yard crane scheduling in port container terminals*. Applied Mathematical Modelling. Volumen 29(3), pp: 263-275. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X04001167>
455. Ng, W.C. y Mak, K.L. (2005b). *An effective heuristic for scheduling a yard crane to handle jobs with different ready times*. Engineering Optimization 37(8):867-877 (Diciembre 2005). DOI: 10.1080/03052150500323849. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017]. https://www.researchgate.net/publication/245310608_An_effective_heuristic_for_scheduling_a_yard_crane_to_handle_jobs_with_different_ready_times
456. Ng, W.C. y Mak, K.L. (2006). *Quay crane scheduling in container terminals*. Engineering Optimization 38(6), pp: 723-737 (September 2006). DOI: 10.1080/03052150600691038. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.01.2017]. https://www.researchgate.net/publication/245310651_Quay_crane_scheduling_in_container_terminals
457. Ng, W.C., Mak, K.L. y Tsang, W. (2006). *Scheduling yard crane in a port container terminal using genetic algorithm*. International Journal of Industrial Engineering 13(3),

- pp:246-253 (September 2006) Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/295650779_Scheduling_yard_crane_in_a_port_container_terminal_using_genetic_algorithm
458. Ng, W.-C. y Wong, C.-S. (2006). *Evaluating the impact of vessel-traffic interference on container terminal capacity..* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 132(2), pp. 76-82, 2006. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-950X%282006%29132%3A2%2876%29?journalCode=jwped5>
459. Ng, W.C., Mak, K.L. y Zhang, Y.X. (2007). *Scheduling trucks in container terminals using a genetic algorithm.* Engineering Optimizacón. Volume 39 (2007) – Issue 1, pp: 33 -47. <http://dx.doi.org/10.1080/03052150600917128>. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03052150600917128>
460. Nguyen, V.D. y Kim, K. H. (2009). *A dispatching method for automated lifting vehicles in automated port container terminals.* Computers & Industrial Engineering, 56; pp: 1002–1020.
461. Nishimura, E.; Imai A. y Papadimitriou, S. (2001). *Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms.* European Journal of Operational Research vol. 131, Issue: 2, June 1, 2001, pp. 282-292. (2001). Disponible en fecha de acceso el 21.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/4869397_Berth_allocation_planning_in_the_public_berth_system_by_genetic_algorithms_European_Journal_of_Operational_Research_131_282-292
462. Öñüt, S. y Saglam, C.Ö. (2008). *Modeling and optimization of general cargo port operations through fuzzy minimal spanning tree and fuzzy dynamic programming approached.* International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 4, Number 8, August 2008 pp. 1835—1851(2008). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 22.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/286805347_Modeling_and_optimization_of_general_cargo_port_operations_through_fuzzy_minimal_spanning_tree_and_fuzzy_dynamic_programming_approaches
463. Øvstebøa, B.O.; Hvattuma, L.M.; y Fagerholt K. (2011a). *Routing and scheduling of RoRo ships with stowage constraints.* Transportation Research Part C: Emerging Technologies. vol (6) , pp: 1225–1242. DOI: 10.1016/j.trc.2011.02.001. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.11.2016].
https://www.researchgate.net/publication/251630820_Routing_and_scheduling_of_Ro_Ro_ships_with_stowage_constraints

464. Øvstebøa, B.O.; Hvattuma, L.M.; y Fagerholt K. (2011b). *Optimization of stowage plans for RoRo ships*. Computers & Operations Research, vol 38(10), pp: 1425–1434. Disponible en [fecha de acceso el 24.11.2016]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811000086>
465. Oztanriseven, F.; Pérez-Lespier, L.; Long, S. y Nachtmann, H. (2014). *A Review of System Dynamics in Maritime Transportation*. Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference. Editado por Y. Guan y H. Liao. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://transportation.mst.edu/media/research/transportation/documents/publications/A%20Review%20of%20System%20Dynamics%20in%20Maritime%20Transportation.pdf>
466. Pachakis, D. y Kiremidjian, A.S. (2003). *Ship traffic modeling methodology for ports*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 129(5), pp. 193-202, 2003. Disponible en [fecha de acceso el 03-10-2016] [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129%3A5\(193\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129%3A5(193))
467. Padberg, M. y Rinaldi, G. (1991). *A Branch-and-Cut Algorithm for the Resolution of Large-Scale Symmetric Traveling Salesman Problems*. Annals of Operations Research, vol 50(1), pp 37–59. Disponible en [fecha de acceso el 22.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBBF02085634>
468. Park, C. S. y Noh Y.D: (1987). *A port simulation model for bulk cargo operations*. SIMULATION vol 48 (6), pp: 236-246. doi>10.1177/003754978704800605. Disponible en [fecha de acceso el 18.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754978704800605?journalCode=simb>
469. Park, Y. M. y Kim, K. H. (2002). *Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique*. The Journal of the Operational Research Society, 53(9), 1054-1062. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 18.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fpalgrave.jors.2601412>
470. Park, Y.-M. (2003). *Berth and crane scheduling of container terminals*. PhD Thesis, Busan National University.
471. Park, Y. M. y Kim, K. H. (2003). *A scheduling method for Berth and Quay cranes*. OR Spectrum, 25, Págnas 1-23. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 18.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/291141785_A_scheduling_method_for_Berth_and_Quay_cranes
472. Park, N.K.; Seo, C.G.; Choi, H.R.; Dragović, B.; Chen, T.; Lee, Y.C.; Lim, S.Y.; Cho, K.S. y Lee, J.Y. (2006). *A Study on Improvement of Calculation System of Optimal*

- Throughput per Berth in Korea Container Terminal*. Final Report for Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (MOMAF), Republic of Korea, Busan, 2006.
473. Park, N.K.; Dragović, B.; Meštrović, R. Y Kim, J.Y. (2007). *Simulation and analysis of container terminals operations – case study: Korean ports*. Modelling and Optimization in the Machines Building Field, MOCM – 13, Vol. 3(2007), pp: 171-180.
 474. Park, N.K. y Dragović, B. (2008). *Simulation study of container terminal throughput optimization*. Proceedings of the 8th International Conference “Research and Development in Mechanical Industry” – RaDMI 2008, 14-17 de Septiembre de 2008, Užice, Serbia, pp: 78-89.
 475. Park, N.-K. y Dragović, B. (2009). *A Study of Container Terminal Planning*. FME Transactions (2009) 37, pp: 203-209. Disponible en [fecha de acceso el 18.10.2016] http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol37/4/06_n-kpark.pdf
 476. Park, T.; Choe, R.; Kim, Y. H. y Ryu, K. R. (2011). *Dynamic adjustment of container stacking policy in an automated container terminal*. International Journal of Production Economics. vol 133(1), pp: 385-392.
 477. Park, N.K.P. ; Dragović, B.; Zrnić, N. y Moon, Daniel S-H (2012b). *Simulation Approach of Container Terminal Modelling*. The 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD 2012), Vienna University of Technology, Viena, Austria. 6 Páginas. Disponible en [fecha de última consulta el 25.02.2017] http://seth.asc.tuwien.ac.at/proc12/full_paper/Contribution218.pdf
 478. Parola, F. y Sciomachen, A. (2005). *Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models*. International Journal of Production Economics 97(1), pp:75-88 · Febrero 2005. DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.06.051. Disponible bajo petición en en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222780369_Intermodal_container_flows_in_a_port_system_network_Analysis_of_possible_growths_via_simulation_models
 479. Parola, F. y Sciomachen, A. (2009). *Modal split evaluation of a maritime container terminal*. Maritime Economics & Logistics, Volumen 11(1), pp: 77-97. (doi:10.1057/mel.2008.22) Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/24110603_Modal_split_evaluation_of_a_maritime_container_terminal.
 480. Parreño, F.; Alvarez-Valdes, R.; Oliveira J.F. y Tamarit J.M. (2007). *A maximal-space algorithm for the container loading problem*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia. (Burjassot, Valencia, España).

- Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.uv.es/sestio/TechRep/tr03-07.pdf>
481. Peng, J.; Zhou, Z. y Li, R. (2015). *A Collaborative Berth Allocation Problem with Multiple Ports Based on Genetic Algorithm*. Journal of Coastal Research: Special Issue 73 - Recent Developments of Port and Ocean Engineering (2015), pp: 290-297. doi: <http://dx.doi.org/10.2112/SI73-051.1> Disponible en [fecha de acceso el 10.02.2017] <http://www.bioone.org/doi/abs/10.2112/SI73-051.1?journalCode=coas>
482. Petering, M.E.H. (2009). *Effect of block width and storage yard layout on marine container terminal performance*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 45(4), pp: 591-610. Disponible en [fecha de acceso el 10.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554508001518>
483. Petering, M.E.H. y Murty, K.G. (2009). *Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal*. Computers & Operations Research, Vol. 36(5), pp: 1711-1725. Disponible en [fecha de acceso el 10.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054808000798>
484. Petering, M.E.H.; Wu, Y.; Li, W.; Goh, M. y de Souza, R. (2009). *Development and simulation analysis of real-time yard crane control systems for seaport container transshipment terminals*. OR Spectrum, Vol. 31(4), pp: 801-835. Disponible en [fecha de acceso el 10.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-008-0142-7?no-access=true>
485. Peterkofsky, R.I. y Daganzo, C.F. (1990). *A branch and bound solution method for the crane scheduling problem*. Transportation Research Part B 24, pp: 159–172. Disponible en [fecha de acceso el 10.10.2016]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019126159090014P>
486. Pisinger, D. (2002). *Heuristics for the container loading problem*. European Journal of Operational Research, vol 141(2); pp: 382-392. Disponible en [fecha de acceso el 10.12.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00132-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00132-7)
487. Powell, W.B. y Carvalho, T.A. (1998). *Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations*. Transportation Science 32(2), pp: 110–126. (1998). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 27.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2364767_Real-Time_Optimization_of_Containers_and_Flatcars_for_Intermodal_Operations

488. Prais, M. y Ribeiro, C.C. (2000). *Reactive GRASP: An application to a matrix decomposition problem in TDMA traffic assignment*. INFORMS Journal on Computing 12, pp: 164-176. Disponible en [fecha de acceso el 27.10.2016] <https://pdfs.semanticscholar.org/8000/29086a84b4daffa3c84ad1d48cb318b819cf.pdf?ga=1.115801861.2090556174.1478134489>
489. Preston, P., y Kozan. E. (2001). *An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals*. Computers & Operations Research Vol 28, pp: 983-995.DOI: 10.1016/S0305-0548(00)00020-4. Disponible en [fecha de acceso el 27.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054800000204>
490. Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A. y Vetterling, W. T. (1992). *Van Wijngaarden-Dekker-Brent Method" Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing*, 2nd Edition. Cambridge, England: Cambridge University Press, pp: 352-355, 1992. ISBN-10: 052143064X / ISBN-13: 978-0521430647
491. Prim, R.C. (1957). *Shortest connection networks and some generalizations*. Bell System Technical Journal, 36 (Noviembre 1957), pp. 1389–1401. Disponible en [fecha de acceso el 27.10.2016] <http://bioinfo.ict.ac.cn/~dbu/AlgorithmCourses/Lectures/Prim1957.pdf>
492. Prudius, A. A., y Andradóttir. S. (2004). *Simulation optimization using balanced explorative and exploitative search*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, ed. R. G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, 545–549. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 15.09.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/b2b0/2a7cad2bf5470606ffe05325696c60fd3bf8.pdf>
493. Prudius, A. A. (2007). *Adaptive random search methods for simulation optimization*. Ph.D. thesis, H. Milton. Stewart School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA. Disponible en [fecha de acceso el 10.02.2017] <http://etd.gatech.edu/theses/available/etd-06252007-161154>.
494. Qiu, L. y Hsu, W.-J. (2000). *Conflict-free AGV routing in a bi-directional path layout* Proceedings of the 5th International Conference on Computer Integrated Manufacturing (ICCIM , 28–30 Mayo 2000), vol 1, pp: 392–403. Gintic Institute of Manufacturing Technology, Singapore. (2000)
495. Qiu, L. y Hsu W.-J. (2001a). *Adapting sorting algorithms for routing AGVs on a mesh-like path topology* Technical Report CAIS-TR-00-28, Nanyang Technological University, School of Applied Science, Centre for Advanced Information Systems. (2001)

496. Qiu, L. y Hsu, W.-J. (2001b). *Scheduling of AGVs in a mesh-like path topology*. Technical Report CAIS-TR-01-34, Nanyang Technological University, School of Computer Engineering, Centre for Advanced Information Systems. (2001).
497. Qiu, L. y Hsu, W.-J. (2001c). *Scheduling of AGVs in a mesh-like path topology (II): a case study in a container terminal*. Technical Report CAIS-TR-01-35, Nanyang Technological University, School of Computer Engineering, Centre for Advanced Information Systems. (2001)
498. Qiu, L.; Hsu, W.-J.; Huang, S. Y. y Wang, H. (2002). *Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey*. International Journal of Production Research vol 40, pp: 745–760.
499. Raa, B.; Dullaert, W. y Van Schaeren, R. (2011). *An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem*”, Expert Systems with Applications Volumen 38 (11), pp: 14136- 14147 (2011). DOI: 10.1016/j.eswa.2011.04.224. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220214664_An_enriched_model_for_the_integrated_berth_allocation_and_quay_crane_assignment_problem
500. Radmilović, Z. (1992). *Ship-berth link as bulk queuing system in ports*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 118(5), pp: 474- 495. [fecha de acceso el 07.02.2017] <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-950X%281992%29118%3A5%28474%29>
501. Radmilović, Z.; Čolić, V. y Hrle, Z., (1996). *Some Aspects of Storage and Bulk Queueing Systems in Transport Operation*. Transportation Planning and Technology, vol 20(1), pp: 67-81. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03081069608717580>
502. Ramani, K. V. (1996). *An Interactive Simulation Model for the Logistics Planning of Container Operations in Seaports*. Simulation, Volumen 66 (5), pp: 291-300. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979606600503>
503. Rana, K. y Vickson, R. (1991). *Routing container ships using lagrangean relaxation and decomposition*. Transportation Science, vol. 25, pp. 201-214. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/242933276_Routing_Container_Ships_Using_Lagrangean_Relaxation_and_Decomposition
504. Rashidi, H. y Tsang, E. P. (2013). *Novel Constrains Satisfaction Models for Optimization Problems in Container Terminals*. Applied Mathematical Modelling, vol. 37(6), pp.

- 3601-3634. Disponible en [fecha de acceso el 29.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/257161806_Novel_constraints_satisfaction_models_for_optimization_problems_in_container_terminals
505. Ratcliff, M.S.W. y Bischoff, E.E. *Allowing for weight considerations in container loading*. OR Spektrum, vol 20(1), pp: 65-71, 1998. Disponible en [fecha de acceso el 29.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1007/BF01545534>
 506. Rebollo, M.; Julian, V., Carrascosa, C. y Botti, V. (2000). *A Multi-Agent System for the Automation of a Port Container Terminal*. Proceeding of the 4th Autonomous Agents 2000 Workshop on Agents in Industry. 3-7 de Junio de 2000-. Barcelona (España). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://users.dsic.upv.es/~vinglada/download/agentw.pdf>
 507. Reeves, C. (1993). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Scientific Publications. John Wiley & Sons, Inc. New York, (USA) ©1993. ISBN:0-470-22079-1
 508. Resende, M.G.C y Ribeiro, C.C. (2003). *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*. Handbook of Metaheuristics, F.Glover and G.Kochenberger, Eds., Kluwer Academic Publishers, pp: 219-249.
 509. Reveliotis, S. A. (2000). *Conflict resolution in AGV systems*. IIE Transactions vol 32, pp: 647–659.
 510. Revetria R.; F. Oliva y M. Mosca (2008). *Modelling of Voltri Terminal Europe in Genoa Using System Dynamic Model Simulation*. Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE '08). Disponible en [fecha de acceso el 26.02.2017] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2008/venice/icosse/icosse67.pdf>
 511. Ribeiro, G.; Mauri, G.; Beluco, S.C. y Laporte, G. (2016). *Berth Allocation in an Ore Terminal with Demurrage, Despatch and Maintenance*. Computers & Industrial Engineering 96 (March 2016). DOI: 10.1016/j.cie.2016.03.005. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/297891090_Berth_Allocation_in_an_Ore_Terminal_with_Demurrage_Despatch_and_Maintenance
 512. Rida M.; Mouncif, H. y Boulmakoul, A. (2011). *Application of Markov decision processes for modeling and optimization of decision-making within a container port*. Advances in Intelligent and Soft Computing, vol 96 (2011), pp: 349–358. doi:[10.1007/978-3-642-20505-7_31](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20505-7_31). Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-20505-7_31

-
513. Rida, M. (2014). *Modeling and Optimization of Decision-Making Process During Loading and Unloading Operations at Container Port*. Arabian Journal for Science and Engineering, vol 39(11), pp: 8395–8408. (DOI: 10.1007/s13369-014-1328-8). Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://paperity.org/p/36739669/modeling-and-optimization-of-decision-making-process-during-loading-and-unloading>
514. Rizzoli, A.; Gambardella, L.M. y Bontempi, G. (1997). *Simulation of an Intermodal Container Terminal to Assist the Management in the Decision Making Process*. Proceedings of 9th International Congress on Modeling and Simulation, Hobart, Tasmania. Pagina 1508-1512. Disponible en [fecha de acceso el 27.09.2016] https://www.researchgate.net/publication/200058815_Simulation_of_an_intermodal_container_terminal_to_assist_the_management_in_the_decision_making_process
515. Rizzoli, A. E.; Fornara, N. y Gambardella, L. M. (1999a). *A simulation tool for combined rail-road transport in intermodal terminals*. Proceedings of the conference MODSIM 1999, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand (1999). Disponible en [fecha de acceso el 27.09.2016] https://www.researchgate.net/publication/222395555_A_simulation_tool_for_combined_railroad_transport_in_intermodal_terminals
516. Rizzoli, A. E.; Gambardella, L. M.; Zaffalon, M. y Mastrolilli, M. (1999b): *Simulation for the evaluation of optimised operations policies in a container terminal*. HMS99, Maritime & Industrial Logistics Modelling and Simulation, Sep 16-18, Genoa, Italy.. Disponible en [fecha de acceso el 15.09.2016] en <http://www.idsia.ch/~luca/hms99.pdf>.
517. Rizzoli, A.; Fornara, N. y Gambardella, L. (2002). *A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals*” Mathematics and Computers in Simulation Volumen 59 (Numero 1-3), pp: 57-71. . Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017]. <http://people.idsia.ch/~luca/matcom02.pdf>
518. Roach, P.A. y Wilson I.D. (2002). *A genetic algorithm approach to strategic stowage planning for container-ships*. Working paper, University of Glamorgan, UK. (2002).
519. Robenek, T.; Umang, N. y Bierlaire, M. (2012): *Integrated Berth Allocation and Yard Assignment in Bulk Ports using Column Generation*. Ecole Polytechnique Federale Lausanne (2012). Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] http://www.strc.ch/conferences/2012/Robenek_Umang_Bierlaire.pdf
520. Ronen, D. (1983). *Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems*. European Journal of Operational Research, Vol. 12(2), pp: 119-126. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90215-1](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(83)90215-1)

521. Rustell, M. (2014). *Optimising a breakwater layout using an iterative algorithm*. HR Wallingford y University of Surrey. Recurso No publicado disponible en [fecha de acceso el 30.09.2016] http://www.pianc.org/downloads/dwa/BREAKWATER%20LENGTH%20OPTIMISATION%20USING%20AN%20ITERATIVE%20ALGORITHM.%20M.Rustell_2014.pdf
522. Saanen, Y. (2003). *The design and assessment of next generation automated container terminals*. Proceedings of 15th European Simulation Symposium, Delft, (Holanda), pp:1-8 . Disponible en [fecha de acceso el 30.09.2016] https://www.tba.nl/resources/press+section/publications/2003_terminaldesign.pdf
523. Sacone, S. y Siri, S. (2009). *An integrated simulation-optimization framework for the operational planning of seaport container terminals*. Mathematical and Computer Modeling of Dynamical System, Volumen 15 (3), pp: 275-293. Disponible en [fecha de acceso el 30.09.2016] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13873950902808636>
524. Sammarra, C.; Cordeau, J.-F.; Laporte, G. y Monaco, M.F (2007). *A Tabu Search Heuristic for the Quay Crane Scheduling Problem*. Journal of Scheduling October 2007, Volume 10, Issue 4-5, pp 327-336 (2007). Disponible bajo petición en [feccha de último acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/225851071_A_tabu_search_heuristic_for_the_quay_crane_scheduling_problem
525. Saranen, J. y Hilmola, P.P. (2010). *Intermodal transportation in emergency situations in the Gulf of Finland*. Department of Industrial Engineering and Management. Kouvola Research Unit. Research Report 223 - Lappeenranta University of Technology. 172 páginas 8 ISBN 978-952-214-935-0; ISBN 978-952-214-936-7 (pdf); ISSN 1459-3173) Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] en http://www.stoca-simulation.fi/files/download/Research_Report_223.pdf
526. Sauri, S. y Martin, E. (2011). *Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol 47(6), pp: 1038-1057.
527. Schneidereit, G.; Vos, S.; Parra, A. y Steenken, D. (2003). *A general pickup and delivery problem for automated guided vehicles with multiloads: a case study*. Working paper, University of Hamburg. (2003)
528. Scheithauer, G. (1999). *LP-based bounds for the container and multi-container loading problem*. International Transactions in Operational Research vol 6, pp: 199–213.

529. Schonfeld, P. y Sharafeldien O. (1985). *Optimal berth and crane combinations in container ports*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Volumen 111 (6), pp: 1060–1072. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 27.09.2016] https://www.researchgate.net/publication/245292357_Optimal_Berth_and_Crane_Combinations_in_Containerports
530. Schrady, G.K.S. y Vassian, R.B. (1996). *Predicting ship fuel consumption*. Technical Repopr. NPS-OR-96-007, Naval Postgraduate School, Monterey, California, (1996).
531. Sciomachen, A. y Tanfani, E. (2007). *A 3d-bpp approach for optimising stowage plans and terminal productivity*. European Journal of Operational Research, vol 183(3), pp: 1433–1446. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.11.067>
532. Sculli, D. y Hui, C. F. (1988): *Three dimensional stacking of containers*. Omega Volumen 16(6), pp: 585–594. (1988). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 18.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/23793512_Three_dimensional_stacking_of_containers
533. Segovia, R. (2009). *Simulación de sistemas para la optimización del almacenamiento y despacho de los productos de gas natural*. Ingeniería Industrial, núm. 27, 2009, pp. 81-98. ISSN 1025-9929. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428493006>
534. Sgouridis, S.P y Angelides, D.C. (2002). *CEPM 2: simulation-based analysis of handling inbound containers in a terminal*. Proceedings of the 34th conference on Winter simulation: Exploring new frontiers (2002). Editado por E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, y J. M. Charnes, pp: 1716-1724. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]. <http://www.informs-sim.org/wsc02papers/235.pdf>
535. Sgouridis, S.P., Makris, D. y Angelides, D.C. (2003). *Simulation analysis for midterm yard planning in container terminal*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Volumen 129(4), pp: 178-187. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129:4\(178\)](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:4(178)).
536. Shabayek, A. y Yeung, W. (2002). *A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong*. European Journal of Operational Research Volumen 140 (2002), pp: 1–11. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.472.4471&rep=rep1&type=pdf>

537. Shen, W.S.. y Khoong, C.M. (1995). *A DSS for empty container distribution planning*. Decision Support Systems, vol 15(1); pp: 75-82. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222477839_A_DSS_for_empty_container_distribution_planning
538. Shi, X. y Voß, S. (2007). *Container terminal operations under the influence of shipping alliances*. Incluido como capítulo 9 del libro Bichou *et al.* (2013) pp: 135 - 160. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <https://books.google.es/books?id=Hk5KAgAAQBAJ&pg=PA135&lpg=PA135&dq=Container+terminal+operations+under+the+influence+of+shipping+alliances&source=bl&ots=yxFfybWHXk&sig=FVgrHrQAfzzetbrrAHxux2FoQSE&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEWi5idyTpfnPahUFHxoKHW7wC8cQ6AEIJDA#v=onepage&q=Container%20terminal%20operations%20under%20the%20influence%20of%20shipping%20alliances&f=false>
539. Shields, J.J. (1984). *Container Stowage: A computer aided preplanning system*. Marine Technology. Volumen 21, pp: 370-383. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/245782348_Containership_Stowage_A_Computer-Aided_Preplanning_System
540. Shire, S. (2015). *Applied modelling algorithms for ports and terminals*. Port Technology. Volumen 66 (2015). Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.porttechnology.org/technical_papers/applied_modelling_algorithms_for_ports_and_terminals
541. Shoham Y. y Leyton-Brown. K. (2008). *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 496 páginas , ISBN 978-0-521-89943-7.
542. Siebers, P.-O. y Aickelin, U. (2008). *Introduction to multiagent simulation*. Lecciones de la School of Computer Science & IT (ASAP). University of Nottingham. (Nottingham, UK). Disponible en [fecha de consulta 03.11.2016] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0803/0803.3905.pdf>
543. Silva, V.M., Coelho, A.S., Novaes, A.G., & Lima, O.F.Jr. (2011). *Remarks on Collaborative Maritime Transportation's Problem Using System Dynamics and Agent Based Modeling and Simulation Approaches*. IFIP Advances in Information and Communication Technology y Working Conference on Virtual Enterprises PRO-VE 2011: Adaptation and Value Creating Collaborative Networks. Vol 1, pp: 245-252.

- Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016]
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23330-2_27
544. SIMIO (2016). *SIMIO: Port Simulation Software*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pennsylvan, USA). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
<http://www.simio.com/applications/port-simulation-software/>
545. SIMULART (2013). *SIMULART: Simulación de Puertos Comerciales*. Promodel-Simulart. Providencia. Santiago – Chile. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]
<http://www.simulart.cl/industrias/puertos-comerciales/>
546. Sinha-Ray, P., J. Carter, T. Field, J. Marshall, J. Polak, K. Schumacher, D. Song, J. Woods, y J. Zhang. (2003). *Container World: Global agent-based modelling of the container transport business*. Proceedings of the 4th Workshop on Agent-Based Simulation, Edited by M.-M. Seidel. SCS Europe BVBA. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/12836.PDF>
547. Siroky, J. (2011). *Automatic transshipment systems for container transport in terminals*. Perner's Contacts, vol 3(4), pp. 145-154. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
http://pernerscontacts.upce.cz/22_2011/Siroky.pdf
548. SMS (2016). *Optimising Pit to Port Logistics: Designing a Mining Supply Chain with Confidence*. Simulation Modelling Servives PTY Ltd. Riverside Drive Mayfield West NSW 2304. New Castle (Australia). Disponible en [fecha de consulta 12.01.2017]
<https://www.arenasimulation.com/resources/SMS-case-study-mining-supply-chain-2016-08-23-print.pdf>.
549. Song, L.; Cherrett, T. y Guan, W. (2011). *Study on berth planning problem in a container seaport: Using an integrated programming approach*. Computers & Industrial Engineering, vol 62(1), pp: 119–128. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835211002531?np=y&npKey=a_fcbbafdc253f20919f6bf99fb95b9aa7e01e462a600edc42d008a96e20269d7
550. Speer U.; John, G. y Fischer, K. (2011). *Scheduling Yard Cranes Considering Crane Interference*. Lecture Notes in Computer Science Volume 6971, 2011, pp: 321-340. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-24264-9_24?no-access=true
551. Stahlbock, R. y Voß, S. (2008). *Operations research at container terminals: a literature update*. OR Spectrum, vol 30(1), pp: 1–52. DOI 10.1007/s00291-007-0100-9. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017]

https://www.researchgate.net/publication/225323734_Operations_research_at_container_terminals_A_literature_update

552. Stahlbock, R. y Voß, S. (2010). *Efficiency considerations for sequencing and scheduling of double-rail-mounted gantry cranes at maritime container terminals*. International Journal of Shipping and Transport Logistics. Vol 2(1), pp: 95-123. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSTL.2010.029899>
553. Stchedroff, N. y Cheng, R.C.H. (2003). *Modelling a continuous process with discrete simulation techniques and its application to LNG Supply chains*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (editado por: S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, y D. J. Morrice), pp: 1607-1611. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc03papers/204.pdf>
554. Steenken, D. (1992). *Fahrwegoptimierung am Containerterminal unter Echtzeitbedingungen*. OR Spektrum vol 14(3), pp: 161–168. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/BF01783519?no-access=true>
555. Steenken, D.; Henning, A.; Freigang, S. y Vos, S. (1993). *Routing of straddle carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves*. OR Spektrum vol 15(3), pp: 167–172. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02733716?no-access=true>
556. Steenken, D. (1999). *Latest operational experience with satellite based container positioning systems*. Proceedings of the Container Handling, Automation and Technology, IIR, London, (1999). Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://www.hhla.de/de/Presse/index.jsp>
557. Steenken, D.; Henning, A.; Freigang, S. y Vos, S. (1993). *Routing of straddle carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves*. OR Spektrum Vol 15(3), pp: 167–172. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02733716?no-access=true>
558. Steenken, D.; Winter, T. y Zimmermann, U.T. (2001). *Stowage and transport optimization in ship planning*. Grötschel M, Krumke S O, Rambau J (eds) Online optimization of large scale systems, pp 731–745. Springer, Berlin. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-04331-8_35

559. Steenken, D. (2003). *Optimised vehicle routing at a seaport container terminal*. Orbit, vol 4; pp: 8–14.
560. Steenken, D., Voß, S. y Stahlbock, R. (2004) *Container terminal operation and operations research - a classification and literature review*. OR Spectrum, 26 (1) 3–49. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/225493172_Container_terminal_operation_and_operations_research_-_A_classification_and_literature_review
561. Süze, R.O. (2015). *Discrete Event Simulation Helps to Improve Terminal Productivity for New Design Container Ships*. Master Thesis West Pomeranian University of Technology, Szczecin y Federal University of Rio de Janeiro. Dirigido por Prof. Ludmila Filina-Dawidowicz, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland y Prof. Jean-David Caprache, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://www.oceanica.ufrj.br/labsen/arq_publicacoes/zWrIstStw.pdf.
562. Suban, D.T. y Twrdy, E. (2008). *Decision support for optimal repositioning of containers in a feeder system*. Promet Traffic & Transportation, Vol. 20(2), pp: 71-77.
563. Swinerd, C. (2014). *On the design of hybrid simulation models, focusing on the agent-based and system dynamics combination*. Phd Thesis. Supervisor: Dr KR McNaught. Cranfield University. Disponible en [fecha de acceso el 29-11-2016] <http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.613543>
564. Tahar, R.M. y Hussain, K. (2000). *Simulation and analysis for the Kelang Container Terminal operations*. Logistics Information Management, Vol. 13(1), pp: 14-20. (ISSN: 0957-6053). Disponible en [fecha de acceso el 29-11-2016] https://www.researchgate.net/publication/235317807_Simulation_and_analysis_for_the_Kelang_Container_Terminal_operations
565. Taleb-Ibrahimi, M.; Castilho, B. y Daganzo, C. F. (1993). *Storage space vs handlingwork in container terminals*. Transportation Research-B 27B, vol 27(1), pp: 13–32. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(93\)90009-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(93)90009-Y)
566. Tavakkoli-Moghaddam, R.; Makui, A.; Salahi, S.; Bazzazi, M. y Taheri, F. (2009). *An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports*. Computers & Industrial Engineering, volumen 56, pp: 241–248. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222566284_An_efficient_algorithm_for_solving_a_new_mathematical_model_for_a_quay_crane_scheduling_problem_in_container_ports

567. Tavares de Azevedo, A; Ribeiro, C.M.; Sena, G.; Chaves, A.A.; Salles, L.L. y Moretti, A.C. (2012). Solving the 3D Container Ship Loading Planning Problem by Representation by Rules and Beam Search. Proceedings of the 1st International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES'12), pp: 132-141. DOI: 10.5220/0003757801320141 Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/257356864_Solving_the_3D_container_ship_loading_planning_problem_by_representation_by_rules_and_beam_search
568. Tavares de Azevedo, A.; Fernandes de Arruda, E.; Leduino de Salles, L.; Neto, Chaves, A.A. Moretti, A.C. (2013). *Solution of the 3D Stochastic Stowage Planning for Container Ships through Representation by Rules*. Proceedings of the 4th international workshop on Knowledge Discovery, Knowledge Management and Decision Support (Mazatlán, Mexico), pp: 120- 129. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/263843634_Solution_of_the_3D_Stochastic_Stowage_Planning_for_Container_Ships_through_Representation_by_Rules
569. Tavares de Azevedo, A; Ribeiro, C.M.; Sena, G.; Chaves, A.A.; Salles, L.L. y Moretti, A.C (2014). Solving the 3D Container Ship Loading Planning Problem by Representation by Rules and Meta-heuristics. International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies vol 6(3), pp:228 - 260. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/264823277_Solving_the_3D_container_ship_loading_planning_problem_by_representation_by_rules_and_meta-heuristics
570. Teo, Y. M. (1993). *PortSim: Simulation and animation of container port*. Proceedings of the 25th Annual Summer Computer Simulation Conference, Boston, USA, The Society for Computer Simulation International (Julio 1993), pp 143-147.
571. Thiers, G. F. y Janssens, G. K. (1998). *A port simulation model as a permanent decision instrument*. SIMULATION 71 (2), pp: 117-25. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220165147_A_Port_Simulation_Model_as_a_Permanent_Decision_Instrument
572. Tian, Y.; Yang, B.; Fu, H. D. y Yu, J. Z. (2011). *Study on equipment scheduling of ZPMC automated container terminal based on improved PSO*. Applied Mechanics and Materials, 143/144, pp: 879-884. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <https://www.scientific.net/AMM.143-144.879>
573. Tong, C. J.; Lau, H. C. y Lim, A. (1999). *Ant colony optimization for the ship berthing problems*. Proceedings of the 5th Asian Computing Science Conference – ASIAN'99 (Lecture Notes in Computer Science, 1742: Berlin: Springer), pp. 359-370

574. Tsai, Y.J.; Ai, C.; Wu, Y. y Siplon, P. (2010). *Simulating Port Logistic Operations using 3D visualization technology*. Nottingham University Press: Proceedings of the International Conference on computing in Civil and Building Engineering (editado por W. Tazani). Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] <http://www.engineering.nottingham.ac.uk/icccbe/proceedings/pdf/pf24.pdf>
575. Tsang, W.S. (2003). *Genetic algorithm for scheduling yard cranes in port container terminals*. Recurso no publicado. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]. https://www.researchgate.net/researcher/26892939_cengyunshi
576. Türkoğulları, Y.B.; Taşkın, Z.C.; Necati Aras, N. y Kuban Altınel, İ. K. (2014). *Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals*. European Journal of Operational Research. Volume 235(1), pp: 88–101. Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.015>
577. Uğurlu, O; Yukseyildiz, E. y Kose, E. (2014). *Simulation Model on Determining of Port Capacity and Queue Size: A Case Study for BOTAS Ceyhan Marine Terminal*. Transnav: The International Journal of Marine Navigation and Safety of Sea Transport. Volumen 8 (1), pp: 143-150. DOI: 10.12716/1001.08.01.16. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/270519563_Simulation_Model_on_Determining_of_Port_Capacity_and_Queue_Size_A_Case_Study_for_BOTAS_Ceyhan_Marine_Terminal
578. Ulusoy G. U.; Sivrikaya-S.; Erifoglu F. y Bilge, Ü. (1997). *A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles*. Computers & Operations Research vol 24(4), pp: 335–351. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054896000615>
579. Umang, N.; Bierlaire, M. y Vacca, I. (2011). *The berth allocation problem in bulk ports*. Ecole Polytechnique Federale Lausanne (2011). Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] <http://www.strc.ch/conferences/2011/Umang.pdf>
580. Umang, N.; Bierlaire, M. y Vacca, I. (2013). *Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. Volumen 54 (Agosto 2013), pp: 14–31. (2013). DOI: 10.1016/j.tre.2013.03.003. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/228533450_Exact_and_Heuristic_Methods_to_Solve_the_Berth_Allocation_Problem_in_Bulk_Ports

581. UNCTAD (1969). *Development of Ports: Improvement of port operations and connected facilities*. Report N° TD/B/C4/421/Rev.1. Publicado por las Naciones Unidas – New York (USA), 1969.
582. Vacca, I.; Bierlaire, M. y Salani, M. (2007). *Optimization at container terminals: Status, trends and perspectives*. 7th Swiss Transport Research Conference. Monte Verità, Ascona (Suiza) (12 – 14 Septiembre de 2007) Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] http://www.strc.ch/conferences/2007/2007_vacca.pdf.
583. Vacca, I.; Salani, M. y Bierlaire, M. (2013). *An Exact Algorithm for the Integrated Planning of Berth Allocation and Quay Crane Assignment*. Journal Transportation Science. Volumen 47 (2), paginas 148-161. (Mayo 2013). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/262219991_An_Exact_Algorithm_for_the_Integrated_Planning_of_Berth_Allocation_and_Quay_Crane_Assignment
584. van Asperen, E.; Dekker, R.; Polman, M. y De Swaan, H. (2003). *Modeling Ship Arrivals In Ports*". Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference – vol 2. , pp: 1737 - 1744, Editado por S. Chick, P.J. Sánchez, D. Ferrin y D.J. Morrice. Disponible en [fecha de consulta 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/4053670_Modeling_Ship_Arrivals_in_Ports
585. van der Heijden, M.; Ebben, M.; Gademann, N. y, van Harten A. (2002). *Scheduling vehicles in automated transportation systems: algorithms and case study*. OR Spectrum vol 24(1), pp:31–58. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://rd.springer.com/article/10.1007/s291-002-8199-x?no-access=true>
586. van Hee, K. y Wijbrands, R. (1998). *Decision support system for container terminal planning*. European Journal of Operational Research. Volumen 34 (3)., pp: 262–272. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221788901476>
587. van Schaeren, R.; Dullaert, W.; Raa, B.; Zampelli, S. y Vergados, Y. (2011). *Berth allocation and quay crane assignment using constraint programming*. Current Issues in Shipping, Ports and Logistics. ISBN: 9789054878582.
588. van Vianen, T.A.; Ottjes, J.A.; Negenborn, R.R. y Lodewijks, G. (2012c). *Simulation-based operational control of a dry bulk terminal*. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2012), Abril 2012, Pekín (China), pp: 73-78. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://www.negenborn.net/pubs/2012-icnsc-vianen-et-al-tech.pdf>

589. Van Zijderverld, E.J.A. (1995). *A structured terminal design method with focus on rain container terminal*. Tesis doctoral en Delft University (1995). ISBN 90-370-0120-3. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:842cf157-c54c-48c9-856b-cc6b3e585836?collection=research>
590. Viera, V.; Gomez Santos, R.; Souza Costa, T. y Muniz Oliveira, A. (2012). *Greedy Heuristic for berth allocation in tidal bulk ports*". Jornada de Informática do Maranhão (JIM 2012)/Escola Regional de Computação dos Estados do Ceará, Maranhão e Piauí (ERCEMAPI 2012). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/230813519_Greedy_Heuristic_for_Berth_Allocation_in_Tidal_Bulk_Ports
591. Vilhelmsen, C.; Lusby, R.M. y Larsen, J. (2013). *Tramp ship routing and scheduling with integrated bunker optimization*. EURO Journal of Transportation and Logistics. Vol 3(2), pp: 143-175. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s13676-013-0039-8?no-access=true>
592. Vis, I.; de Koster, R.; Roodbergen, K.J. y Peeters L.W.P. (2001). *Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal*. Journal of The Operational Research Society - J 01/2001; vol 52(4), pp: 409-417. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fpalgrave.jors.2601094>
593. Vis, I. F.A. y de Koster, R. (2003). *Transshipment of containers at a container terminal: An overview*. European Journal of Operational Research, vol. 147, pp. 1-16. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222400376_Transshipment_of_containers_at_a_container_terminal_An_overview
594. Vis, I. F. A.y Harika, I. (2004). *Comparison of vehicle types at an automated container terminal*. OR Spectrum, vol 26(1), pp: 117-143. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-003-0146-2>
595. Vis, I. F. A.; de Koster, R. y Savelsbergh, M. (2005). *Minimum vehicle fleet size under time-window constraints at a container terminal*. Transportation Science vol 39, pp: 249–260. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www2.isye.gatech.edu/~ms79/publications/terminal.PDF>
596. Vis, I. F. A. (2006). *Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems*. European Journal of Operational Research, vol 170(3), pp: 677-709.

- Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.020>
597. Vis, I. F. A. y Carlo, H. J. (2010), *Sequencing two cooperating automated stacking cranes in a container terminal*. Transportation Science, 44(2), pp: 169-182.
 598. Wallace, A. (2001). *Application of AI to AGV control – agent control of AGVs*” International Journal of Production Research, vol 39(4), pp: 709–726. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
<http://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/00207540010007310?scroll=top&needAccess=true>
 599. Wang, F., y Lim, A. (2007). *A stochastic beam search for the berth allocation problem*. Decision Support Systems, 42(4), pp: 2186-2196. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016792360600090X>
 600. Wang, X.; Wu, L. y Dong, M. (2011). *Modeling and Accomplishment of Loading-and-Unloading Equipment Optimum Allocation System at Bulk Terminal*. International Journal Computing Network Information Security, vol. 2011(3): 1-9. Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016] <http://www.mecs-press.org/ijcnis/ijcnis-v3-n4/IJCNIS-V3-N4-1.pdf>.
 601. Wang, Z.X.; Chan, F.T.S. y Chung, S.H. (2013b). *Storage allocation and Yard Trucks Scheduling in Container Terminals Using a Genetic Algorithm Approach*. 3rd International Conference on Intelligent Computational Systems (ICICS'2013) April 29-30, 2013 Singapore. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://psrcentre.org/images/extrainages/2%20413525.pdf>
 602. Wikipedia - ALG (2016). *Algoritmo*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo>
 603. Wikipedia RNE (2015). *Resolución numérica de ecuaciones no lineales*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Resoluci%C3%B3n_num%C3%A9rica_de_ecuaciones_no_lineales
 604. Wilson, I. D. y Roach, P. A. (1999). *Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning*. Journal of Heuristics, vol 5(4); pp: 403–418. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1009680305670>

-
605. Wilson, I.D. y Roach, P.A. (2000). *Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions*. Journal of the Operational Research Society vol 51(11); pp: 1248–1255. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1057/palgrave.jors.2601022?no-access=true>
606. Wilson, I.D.; Roach P.A. y Ware J.A. (2001). *Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study*. Knowledge-Based Systems 14(3–4), pp: 137–145. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-7051\(01\)00090-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-7051(01)00090-9)
607. Winter, T. y Zimmermann, U. (1998). *Discrete online and real-time optimization*. Proceedings of the 15th IFIP World Computer Congress: Fundamentals – foundations of computer science, Viena (Austria) y Budapest (Hungría), pp: 31–48
608. Winter, T. (1999). *Online and real-time dispatching problems*. PhD Thesis. Beuth Hochschule für Technik Berlin (Beuth University of Applied Sciences Berlin), Berlin (Alemania). 251 Páginas- Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/2584118_Online_and_Real-Time_Dispatching_Problems
609. Wong A. y Kozan E. (2010). *Optimization of container process at seaport terminals*. Journal of the Operational Research Society. Vol 61, pp: 658–665. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://eprints.qut.edu.au/41788/1/41788.pdf>.
610. Wooldridge, J.M. (2002). *An Introduction to Multi Agent Systems*. West Sussex, England, John Wiley and Sons, Ltd. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://coltech.vnu.edu.vn/http/media/courses/AI++/Tai%20lieu/TLTK.pdf>
611. Xiao X.; Low M.Y.H.; Liu, F.; Huang, S.Y.; Hsu, W.J. y Li, Z. (2009). *An Efficient Block-Based Heuristic Method for Stowage Planning of Large Containerships with Crane Split Consideration*. Proceedings of the International Conference on Harbour, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, pp. 93-99. Disponible en [fecha de acceso el 17.02.2017] <http://web.mysites.ntu.edu.sg/yhlow/public/Shared%20Documents/papers/hms09-stowage.pdf>
612. Xingyan Y.; Hua J., Wei L. y Hong L. (2009a). *Study on the navigation capacity of the approach channel of Tianjin Port - Part I*. Port Technology International. Edición 33, pp: 45-47. Disponible en [fecha de acceso el 23-10-2016] <http://satcip.com/radmi/pdf/RaDMI-2009-Proceedings-Vol.1.pdf>

613. Xingyan Y.; Hua J., Wei L. y Hong L. (2009b). *Study on the navigation capacity of the approach channel of Tianjij Port - Part 2*. Port Technology International. Edición 34, pp: 40-41 Disponible en [fecha de acceso el 23-10-2016] https://www.porttechnology.org/technical_papers/study_on_the_navigation_capacity_of_the_approach_channel_of_tianjin_port_pa
614. Xue, Z.; Zhang, C.; Miao, L. y Lin W.-H. (2013). *An ant colony algorithm for yard truck scheduling and yard location assignment problems with precedence constraints*. Journal of Systems Science and Systems Engineering, vol 22(1); pp 21-37. Disponible en [fecha de acceso el 23-10-2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s11518-013-5210-0?no-access=true>
615. Yan, W.; Zhu, Y. y He, Y. (2014). *Performance evaluation of transport vehicle at automated container terminal using simulation*. International Journal of Hybrid Information Technology. Vol 7(2), pp: 237-248. Disponible en [fecha de acceso el 23-10-2016] http://www.sersc.org/journals/IJHIT/vol7_no2_2014/22.pdf
616. Yang, C.; Choi, Y. y Ha, T. (2004). *Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals*. OR Spectrum 26 (149), pp: 149–170. DOI: 10.1007/s00291-003-0151-5. Print ISN 0171-6468. Online ISN 1436-6304. Disponible en [fecha última consulta el 28.11.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-003-0151-5>
617. Yang, C. H.; Choi Y. S. y Ha T. Y. (2005). *Performance evaluation of transport vehicle at automated container terminal using simulation*. OR Spectrum 26(2): Container Terminals and Automated Transport Systems 2005, pp: 79-100.
618. Yang, J. H. y Kim, K. H. (2006). *A grouped storage method for minimizing relocations in block stacking systems*. Journal of Intelligent Manufacturing vol 17 (4), pp: 453-463. Disponible en [fecha última consulta el 28.11.2016] <http://rd.springer.com/article/10.1007/s10845-005-0018-5?no-access=true>
619. Yang, C.; Wang, X. y Li, Z. (2012). *An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal*. Computers & Industrial Engineering 63 (2012) 243–253. (2012). DOI: 10.1016/j.cie.2012.03.004 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 28.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/257177476_An_optimization_approach_for_coupling_problem_of_berth_allocation_and_quay_crane_assignment_in_container_terminal

620. Yang, P.; Sun, J. y Yue W. (2013). *A Novel Genetic Algorithm for Multiple Yard Cranes Scheduling*. Journal of Computational Information Systems vol 9(14); pp: 5761–5769. Disponible en [fecha de acceso el 15.10.2016] <http://www.Jofcis.com>
621. Yazdani, R.; Schmidt F.A., Merkuryev, Y. y Kamperman, F. (2005). *The Generic Animation and Simulation tool for Ports and Terminals*. International Journal of SIMULATION - Vol. 6 (7-8), pp: 61-69. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/228876601_The_Generic_Animation_and_Simulation_Tool_for_Ports_and_Terminals.
622. Yue, Y.; Chun, J. y Lin, H. (2006). *Optimal Planning on Gate System on Container Terminals Based on Simulation Optimization Method and Case Study*. International Conference on Management Science and Engineering, 2006. (ICMSE '06), pp: 342 – 347. Disponible en [fecha de acceso el 28.11.2016] <http://gs1.dlut.edu.cn/newVersion/Files/dsxx/1513.pdf>
623. Yun, W.Y. y Choi, Y.S. (1999). *A simulation model for container-terminal operation analysis using an object oriented approach*. International Journal of Production Economics, Vol. 59 (1-3), pp: 221-230. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527398002138>
624. Zaffalon, M. y Gambardella, L. M. (1998). *Optimization of resources in an intermodal terminal*. Technical Report n. IDSIA-20-98. Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale ©1998.
625. Zampelli, S.; Vergados, Y.; Van Schaeren, R.; Dullaert, W. y Raa B. (2013). *The Berth allocation and quay crane assignment problem using a CP approach*. Lecture Notes in Computer Science. 8124, pp: 880-896. Disponible en [fecha de acceso el 29.01.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-40627-0_64
626. Zeng, M.; Low, M.Y.H.; Jing, H.W.; Ying, H.S.; Liu, F y Aye W.C. (2010). *Improving Ship Stability in Automated Stowage Planning for Large Containerships*. Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientist 2010 – Vol III. (2010). 17-19 de Marzo 2010 (Hong Kong) 6 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010_pp1838-1843.pdf
627. Zeng, Q., y Z. Yang. (2009). *Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals*. Computers and Operation Research vol 36(6), pp:1935-1944. Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2008.06.010>

628. Zhang, C., (2000). *Resource planning in container storage yards*. Ph.D. Thesis, The Hong Kong University of Science and Technology. 342 Páginas.
629. Zhang, C.; Wan, Y.; Liu, J. y Linn, R.J. (2002). *Dynamic crane deployment in container storage yards*. Transportation Research-B, vol 36(6), pp: 537–555. Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00017-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00017-0)
630. Zhang, C.; Liu, J.; Wan, Y.; Murty K.G. y Linn, R.J. (2003). *Storage space allocation in container terminals*. Transportation Research B. vol 37(10), pp: 883–903. DOI: 10.1016/S0191-2615(02)00089-9 · Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222655966_Storage_space_allocation_in_container_terminals
631. Zhang, C., Chen, W., Shi, L., and Zheng, L. (2010a). *A note on deriving decision rules to locate export containers in container yards*. European Journal of Operational Research, vol 205(2), pp: 483-485.
632. Zhang, C.; Zheng L.; Zhang Z.; y Armstrong A.J. (2010b). *The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique*. Computers and Industrial Engineering, vol 58 (1), pp: 40-50. DOI: 10.1016/j.cie.2009.08.002. Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.08.002>
633. Zhang, J.; Yan, X.P.; Chen, X. y Zhang, D. (2011). *Study on the Coordination between Berths and Channels in Tianjin Port*. 1st International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS 2011 © ASCE 2011), pp: 2070-2720. DOI: 10.1061/41177(415)341. Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/269081904_Study_on_the_Coordination_between_Berths_and_Channels_in_Tianjin_Port
634. Zhang,X.; Zeng, Q. y Chen, W. (2013). *Optimization Model For Truck Appointment In Container Terminals*. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013). Procedia - Social and Behavioral Sciences vol 96(2013), pp: 1938 – 1947. Disponible en (fecha de acceso el 12.10.2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.219>
635. Zhang, Y.; Rong, Z. y Liu, Z.-X. (2014). *The Integrated Scheduling Problem in Container Terminal with Dual-Cycle Operation*. International Journal of simulation and modelling 13(3), pp: 225-347. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) http://www.ijsim.com/Full_Papers/Fulltext2014/text13-3_335-347.pdf
636. Zhang, A.; Zhanga, W.; Chena, Y. y Chenb,G. y Chena, X. (2017). *Approximate the scheduling of quay cranes with non-crossing constraints*. European Journal of

- Operational Research. Volumen 258 (3), pp: 820–828. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.021>
637. Zhao, W. y Goodchild, A. V. (2010). *The impact of truck arrival information on container terminal rehandling*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol 46(3), pp: 327-343. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.11.007>
638. Zhao, N.; Mi, W.J. y Bao, X. (2012). *A Method of Quay Crane Scheduling For Container Terminals*. Advanced Materials Research, Volúmenes 524-527 (2012), pp: 824-827. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <https://www.scientific.net/AMR.524-527.824>
639. Zhao, N.; Mi, W.; Mi C. y Chai, J. (2013). *Study on Vessel Slot Planning Problem in Stowage Process of Outbound Containers*. Journal of Applied Sciences. Vol 13(20); pp: 4278-4285. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26.10.2016] <http://scialert.net/abstract/?doi=jas.2013.4278.4285>
640. Zhen, L.; Chew, E. P. y Lee, L. H. (2011). *An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs*. Transportation Science, vol 45, pp: 483–504. (2011). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/261974326_An_Integrated_Model_for_Berth_Template_and_Yard_Template_Planning_in_Transshipment_Hubs
641. Zhou, P.-f. y Kang, H.-g.(2008). *Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal*. Systems Engineering - Theory & Practice, vol. 28 (1), pp: 161 – 169. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 26.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S1874-8651\(09\)60001-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1874-8651(09)60001-6)
642. Zhu, Y. y Lim A. (2004). *Crane Scheduling with Spatial Constraints: Mathematical Model and Solving Approaches*. Proceedings 8th International Symposium on Artificial Intelligence and Mathematics (AI&M 1-2004, 4-6 de enero 2004), Fort Lauderdale (Florida, USA). Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://rutcor.rutgers.edu/~amai/aimath04/AcceptedPapers/Zhu-aimath04.pdf>
643. Zhu, Y. y Lim, A. (2006). *Crane scheduling with non-crossing constraint*. Journal of the Operational Research Society, vol. 57(12), pp: 1464-1471. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fpalgrave.jors.2602110>

Capítulo 3

Entornos de simulación (paradigmas DES, ABS y SD), emulación y modelos físicos en puertos y terminales marítimas.

3.1 Introducción.

Como ya se anticipaba en el apartado 2.2.5, quizá la clasificación más extendida de modelos computacionales en entornos portuarios es aquella que se refiere al paradigma de programación bajo el cual son construidos los modelos; existiendo cierto consenso en agrupar estos en tres grandes bloques: simulación mediante eventos discretos o DES, simulación mediante sistemas basados en agentes o ABS y simulación mediante sistemas dinámicos o SD (Caserta *et al.*, 2011 y Böse, 2011).

Desde una perspectiva generalista estos sistemas habían sido introducidos en el apartado 1.2.2 de esta tesis donde se explicaba como Borshchev y Filippov (2004) proporcionaban una gráfica representación del ámbito de aplicación de cada uno de estos paradigmas basado tanto en el nivel de abstracción necesario para su programación (mayores niveles de abstracción en los modelos SD que en los ABS o DES) como en el atributo de continuidad de los mismos (mientras que los modelos DES y ABS son esencialmente de tipo discreto, los SD son por su propia naturaleza modelos continuos).

En este mismo apartado se anticipaba como diversos autores habían realizado comparaciones entre diferentes paradigmas y como el campo portuario presentaba características que le hacían candidato de someterse a simulación en cualquiera de los tres paradigmas anteriores.

El objetivo de este tercer capítulo de la tesis es presentar las realizaciones más destacadas que en cada uno de los tres paradigmas se han presentado en la gestión de puertos y terminales marítimas, mostrando su evolución temporal y su campo preferente de actuación.

Siguiendo una secuencia histórica en lo que se refiere a su evolución este capítulo comenzará discutiendo los modelos de eventos discretos (apartado 3.2), continuando con los basados en agentes (apartado 3.3), para concluir en los sistemas dinámicos (apartado 3.4).

Al margen de estos tres primeros apartados con un propósito más descriptivo de los paradigmas de programación, se ofrece en este capítulo una sección en el que se discutirá sobre los criterios de selección de los diferentes modelos (apartado 3.5) y otros dos apartados adicionales dedicados a las evoluciones naturales de los clásicos modelos de simulación bajo estos paradigmas. En el primero de ellos se tratarán los modelos de emulación y los sistemas de operación de terminal (referidos en literatura científica como *Terminal Operating System* o de manera simplificada “TOS”) (apartado 3.6) y en el último sobre los modelos físicos o prototipos (apartado 3.7).

3.2 Simulación mediante eventos discretos o “DES”.

Como ya se ha comentado, los primeros ejercicios de simulación fueron desarrollados mediante técnicas de eventos discretos y este paradigma de programación es, a la fecha, el que cuenta con más referencias dentro de la comunidad científica y una mayor variedad de software específico disponible (de código abierto o paquetes comerciales). Esto es así, tanto con carácter general como específicamente en ambientes portuarios.

Según Carteni y de Luca (2009a), el estudio de terminales portuarias puede ser abordado mediante dos métodos diferenciados: optimización o simulación. El primero representa una formulación más elegante y compacta, pero con limitaciones matemáticas que sólo pueden ser cubiertas por las técnicas de simulación, de entre las cuales, los modelos DES han sido la aproximación más comúnmente utilizada.

En la misma línea, Angeloudis y Bell (2011) indican que la simulación se hace indispensable en ambientes portuarios dado el tamaño del sistema y la complejidad del equipamiento. Estas dos características hacen imposible encontrar soluciones analíticas y predecir la respuesta de una terminal ante diferentes configuraciones usando otras técnicas. Así, estos autores concluyen que la simulación es la necesaria *“herramienta para replicar el comportamiento real de la terminal”*. Esta necesidad es además creciente en el tiempo puesto que para estos autores la continua y rápida evolución de los medios de operación en puerto, el volumen de las inversiones requeridas y la necesidad de asegurar la calidad de las soluciones propuestas y minimizar el riesgo de aparición de problemas operacionales una vez que estas son emprendidas obligan a evaluar continuamente las decisiones y chequear su conveniencia.

Estos autores destacan las ventajas de las técnicas de simulación DES sobre las clásicas formulaciones analíticas de optimización, ya que los resultados de los modelos son, en general, más comprensibles y de mayor alcance en el sentido de que pueden estudiarse con más facilidad un mayor abanico de escenarios bajo formulaciones del tipo *“what if”*.

Todas estas características junto con la disponibilidad de herramientas en el mercado (tanto de propósito general como específico) que permiten la confección de modelos DES a un coste razonable y en plazos cortos de tiempo han hecho que, hoy en día, la simulación mediante estas técnicas está ampliamente implantada tanto en la investigación o diseño de terminales como en el día a día de gestión de las mismas en lo que se ha definido en el preámbulo de este capítulo como TOS.

En este apartado de la tesis se realiza un recorrido histórico de cómo se han ido implementando los modelos de simulación DES en el campo portuario, destacando algunas de las realizaciones más relevantes (sería imposible abarcarlas todas) y destacando los diferentes tipos de modelos

que se pueden construir para dar respuesta a preguntas específicas o temas concretos de la gestión de terminales y que ayudan a la implementación de determinadas estrategias en las mismas o a la valoración de sus productividades y análisis de las inversiones más adecuadas.

3.2.1 Conceptos básicos de utilización de técnicas DES en puertos.

Como norma general los modelos portuarios DES tratan el puerto o la terminal como un sistema en el que conviven diferentes elementos (barcos, grúas de muelle o patio, elementos de transporte horizontal,...) y se desarrollan ciertas actividades (carga, descarga, transporte interno,...). Así lo refiere Hassan (1993) cuando define un puerto como un *“sistema complejo que contiene varias entidades con atributos que interfieren entre ellos”*.

Se trata por tanto de un sistema que necesariamente debe abordarse desde técnicas de modelización dinámica (en contraposición a modelos estáticos) dado que el estado del sistema depende del tiempo y varía con él.

La primera decisión a la que se enfrenta el modelador es si trata de simular todos los elementos como un conjunto (lo que se denomina enfoque global o integrado) o si, en función de los resultados que quiere obtener, es posible discretizar el problema y aislar unos procesos de otros centrándose en la resolución de un aspecto concreto (enfoque aislado, simple o individual) facilitando con ello la resolución matemática y minimizando el coste computacional.

Sea como fuere, tanto en el proceso de simulación integrado como en el procedimiento de programación aislado el modelador también debe considerar si las partes en las que se puede dividir el problema se resolverán de manera simultánea o secuencial y en este último caso cual es la jerarquía que se implementará en el modelo.

Históricamente los procesos de investigación operativa y optimización de puertos y terminales se abordaban bien desde un enfoque determinista (según Carteni y de Luca, 2012 el más extendido como norma general) o como un conjunto de procesos estocásticos (sistemas introducidos más recientemente y tratados en Murty *et al.*, 2005). Obviamente, como se analizará, existen enfoques mixtos en los que a unas variables del sistema se les otorga naturaleza determinista, mientras que otras se asocian a procesos estocásticos.

Por poner un ejemplo, en la aproximación determinista los tiempos de operación o llegada son predefinidos e invariables (fijándose en base a datos empíricos de rendimientos reales medios conocidos de estudios anteriores o de observaciones experimentales sobre la terminal o puerto que esté siendo sometido a estudio), mientras que en el enfoque estocástico los tiempos de operación o llegada responden a una u otra distribución estadística (también fijada en base a datos

de operación reales y considerando la distribución que mejor ajusta a los datos muestrales disponibles) no siendo valores fijos sino variables y asociados a una probabilidad de ocurrencia determinada que es función de dicha distribución.

Cualquiera de las dos aproximaciones anteriores se basa como norma general en generar un sistema de colas (colas simples o redes de colas) en las actividades que se desarrollan en el sistema-terminal. La alta complejidad de las relaciones que se establecen en los puertos puede hacer que la resolución matemática de estos sistemas de colas sean inabordables desde el punto de vista analítico tradicional y para ello, la modelización ofrece una alternativa metodológica consistente de tal modo que el modelo resuelve con determinada jerarquía las colas implementando las oportunas subrutinas de cálculo.

Uno de los primeros autores en integrar las disciplinas de simulación y teoría de colas en puertos fueron Nilsen y Abdus-Samad (1977) en su artículo “*Simulation and Queuing Theory in Port Planning*” quienes ya ponían de manifiesto (como más tarde lo haría también Ramini, 1996) que la simulación era un elemento indispensable si se trataba de encontrar soluciones a sistemas estocásticos en los que las distribuciones no se encontraban dentro de la familia de distribuciones Earlang de las que diferentes autores han proporcionado soluciones analíticas.

Avanzando un poco, podría conceptualizarse un modelo como un conjunto de entidades u objetos que van evolucionando hacia diferentes estados a medida que ciertos eventos van ocurriendo. Así, tras la ocurrencia de determinado evento el objeto cambia de estado. Estos objetos pueden ser tanto entidades físicas (por ejemplo una grúa), como conceptuales (flujos de información entre el equipamiento portuario) o matemáticos (relaciones entre las variables).

De igual modo, mientras que ciertos objetos permanecen dentro del sistema constantemente o durante periodos largos de tiempo (a éstos se les llama objetos residentes), otros entran y salen del mismo (a éstos se les refiere como objetos en tránsito). En el ejemplo portuario la grúa sería un objeto residente, mientras que el contenedor o el barco serían objetos en tránsito.

Dentro del modelo, los objetos deben ser caracterizados mediante determinados parámetros y/o variables que pueden a su vez ser estáticas o estacionarios (estos parámetros no evolucionan con el tiempo y se mantienen constantes) o dinámicas (cambiantes con el tiempo). Como se ha analizado, esta caracterización puede ser determinista o estocástica. En un ejemplo portuario un muelle podría ser caracterizado por parámetros estáticos tales como longitud y calado (constantes) y por su estado (libre o sin buque atracado u ocupado con buque atracada); parámetro que obviamente evoluciona con el tiempo configurándose como una variable dinámica del sistema).

Terminando con la caracterización de los elementos que componen un modelo DES se encontrarían las actividades que se desarrollan en el modelo y que son lanzadas ante la aparición de un evento específico. Si las mismas pueden ser asociadas a un objeto concreto esta se definirá

como una actividad “activa” (y usualmente definida por su tiempo de duración que también puede ser constante/determinista o variable/estocástica).

Si por el contrario la actividad no puede ser asociada a una entidad específica la misma se denominará “pasiva”. Mientras que una entidad activa juega un papel determinante en la evolución del sistema, las entidades pasivas son fundamentales en dicha actividad pero no realizan ninguna actividad. Así un muelle sería una entidad pasiva (por ejemplo su longitud, calado y estado libre/ocupado determina si un barco puede atracar o no en él), mientras que las grúas con las que está equipada serían entidades activas (realizan la operación de carga / descarga).

Todos los elementos del sistema–puerto interactúan a través de ciertas reglas de actuación que deben ser convenientemente programadas en el modelo. Estas reglas pueden ser endógenas (propias del sistema e inseparables de la arquitectura y lógica jerárquica que se define en el modelo) o exógenas (dependen de fenómenos externos). Como modelo de reglas endógenas se podrían incluir los criterios de asignación de atraque que siguen cierta lógica (por ejemplo un criterio FIFO) mientras que como reglas exógenas se incluirían, por citar alguna, las decisiones ajenas al sistema tomadas por el operador de la terminal o la propia llegada de barcos al sistema.

Según Bruzzone *et al.* (1999) en modelos portuarios de tipo microscópico¹⁷⁴, la correcta conceptualización de estas relaciones es de vital importancia si se persigue que los resultados sean representativos de la realidad; señalando como elementos destacados en las interferencias entre agentes los siguientes:

- Interferencias en la operación de grúas en el patio;
- Interferencias en la operación de grúas de muelle;
- Interferencias en el tránsito de vehículos de transporte horizontal;
- Interferencias entre la propia mercancía / contenedores (bien en el barco o en las explanadas); y,
- Problemas en relación a los accesos de vehículos a la terminal.

Estas reglas suelen ser a su vez de jerarquía temporal (criterios de asignación de atraque mediante una regla FIFO por ejemplo) o de jerarquía especial (prioridades de paso o de ocupación de espacios, criterios de asignación de un atraque con reglas de preferencia como por ejemplo asignar cierto atraque a cierta tipología de barcos o criterios de localización de contenedores en patio o mercancía en áreas de depósitos).

El sistema se define por su estado que no es otra cosa que la situación en que se encuentra cada entidad en un determinado momento (es decir los valores que toman los atributos que lo definen) siendo una condición indispensable para poder aplicar técnicas DES que las variables que definen

¹⁷⁴ Angeloudis y Bell (2011) definen los modelos microscópicos como aquellos que se construyen con una finalidad operacional más que estratégica (donde un nivel agregado de información es suficiente) y que requieren un alto grado de detalle.

el modelo permanezcan invariables durante el intervalo simulado (el modelo va avanzando a intervalos de tiempo y durante este paso del modelo las variables no cambian de valor). Dicho de otro modo el modelo es de tipo “discreto” en contraposición del otro tipo de modelos que son de naturaleza “continua”.

Resumiendo lo que se ha comentado hasta este momento, el equipamiento de la terminal es una entidad residente y activa donde los parámetros que lo caracterizan serían por ejemplo su estado de ocupación (ocioso u ocupado) y posición dentro de la terminal y las actividades que realizan pueden definirse mediante su capacidad y productividad (duración de las tareas que desarrolla). Estas productividades pueden definirse de manera determinista (por ejemplo el rendimiento de una grúa es constante en un determinado valor de tonelada/hora que se considera fija) o estocástica (los tiempos de servicio ajustan a una determinada función probabilística).

Un contenedor sería una entidad en tránsito y pasiva donde los parámetros que lo caracterizan serían su tamaño (los más utilizados de 20”, los de 40”,...), clasificación (mercancía peligrosa, perecedero, refrigerado,...), tipo (import, export o en transbordo), estado lleno/vacío, estado en movimiento / apilado, posición (coordenadas en el parque), etc. Obviamente un contenedor no realiza ninguna actividad pero es esencial en la definición del estado en que en cada momento se encuentra el sistema.

Las infraestructuras (muelles, área de depósito de una terminal de graneles, almacenes, patio de contenedores) son actividades residentes y pasivas. Su caracterización se basa en parámetros físicos (longitud, área, número de slots, altura de apilado que permite, etc...) y de estado (ocupado u ocioso / vacío).

3.2.2 Utilización de técnicas DES en entornos portuarios. Estudios recopilatorios y recorrido histórico.

Si bien existen realizaciones y ejemplos muy destacados anteriores a esta fecha¹⁷⁵, la generalización de los modelos DES en entornos portuarios fuera de los ámbitos de organizaciones gubernamentales se podría establecer en los años 80 y reconocer el carácter pionero de los trabajos de Lawrence (1973), Borovits y Ein-Dor (1975) o Collier (1980). Este último ya defendía la utilización de la modelización como una herramienta indispensable para el estudio de sistemas portuarios.

¹⁷⁵ Véase en el apartado 2.3.2. el modelo PORTMODEL de la UNCTAD desarrollado en 1969 o en el apartado 2.3.3. el modelo PORTSIM desarrollado en 1974 por el Banco Mundial.

A los trabajos de estos autores en la década de los 70 o primer año de la década de los 80, seguirían en esta última década los trabajos de Agerschou *et al.* (1983), Tuğcu (1983), El Sheikh *et al.* (1987), Park y Noh (1987), y Chung *et al.* (1988).

En estos primeros modelos se trataban aspectos fundamentalmente operacionales. Así, Agerschou *et al.* (1983) y Tuğcu (1983) construyen un modelo para resolver el BAP que integrarían con la posterior operación de descarga del buque. Estos autores aplican su modelo al caso experimental de un terminal del puerto Estambul (Turquía) con el objetivo de seleccionar la mejor inversión posible y establecer el momento óptimo en el que la misma debe ser realizada. Se fijan como objetivo el minimizar el coste global conjunto de la inversión portuaria y el coste imputable al retraso de los buques. Estos autores presentaban tres escenarios de ampliación: el primero considerando un nuevo puerto, un segundo escenario con ampliación de los muelles existentes y un último en el que se ampliaba la zona de almacenes. En su modelo los autores daban respuesta a la longitud de muelles necesarios, el número de grúas con la que tenía que equiparse el puerto y la capacidad de sus almacenes; todo ello a diferentes niveles de demanda futura. Las valoraciones que realizaban en su modelo se establecían en términos de valor presente neto de las inversiones y se realizaban análisis de sensibilidad con diferentes tasas de descuentos y tasas de devaluación.

Por su parte El Sheikh *et al.* (1987) también desarrollaron un modelo para resolver el BAP, fenómeno que modelizan a través de una secuencia de colas utilizando una aproximación estocástica con distribuciones exponenciales tanto para la llegada de buques como para el servicio de los mismos en muelle. Simultáneamente Park y Noh (1987) utilizan técnicas de simulación Monte Carlo para la determinación de la capacidad portuaria y Chung *et al.* (1988) propusieron un sistema de simulación gráfica para modelizar el uso de espacios de reserva o *buffer* para incrementar la utilización del equipamiento portuario y reducir el tiempo de carga de contenedores.

A estos primeros modelos de los 80 (todavía no muy abundantes y relativamente simples) les sucedería el boom de los años 90, con un mucho mayor número de realizaciones. Los modelos de esta época tratan de representar el sistema de una manera más realista. Para ello se hacía necesario una mayor disgregación de la operativa en varias actividades elementales y los programadores pasan a preocuparse mucho más de los aspectos que tienen que ver con el software, en el desarrollo formal de herramientas prácticas que permitan la realización de ejercicios de simulación y en sus procesos de validación. Así lo ponen de manifiesto Carteni y de Luca (2009a y 2012) quienes citan como ejemplos de esta tendencia a Kondratowicz (1990 y 1992), Silberholz *et al.* (1991), Hassan (1993), Lai y Lam (1994), Hayuth *et al.* (1994), Koh *et al.* (1994a y 1994b), Ramani (1996), Merkurjev *et al.* (1998), Gambardella *et al.* (1998), Nevins *et al.* (1998a y 1998b), Thiers y Janssens (1998), Bruzzone y Signorile (1998), Mastrolilli *et al.* (1998) Yun y Choi (1999).

Continuando con el desarrollo histórico, los modelos de la primera década de los años 2000 siguen avanzando en representar los sistemas de una manera cada vez más realista generalizándose la utilización de modelos para investigación de casos prácticos en terminales de todo el mundo. En esta época los procesos de calibración y validación con datos reales cobran un protagonismo que no habían adquirido previamente. Dentro de este grupo Cartenì y de Luca (2009a y 2012) citan los siguientes ejemplos: Choi y Yun (2000); Tahar y Hussain (2000); Legato y Mazza (2001); Sgouridis y Angelides (2002); Shabayek y Yeung (2002), Kia *et al.* (2002); Parola y Sciomachen (2005); Bielli *et al.* (2006); Lee y Cho (2007); Bugaric y Petrovic (2007); Cortés *et al.* (2007) y Luca *et al.* (2009).

Cartenì y de Luca (2009a) proporcionan un interesante trabajo de recopilación bibliográfica sobre la utilización de este paradigma en la investigación de terminales de contenedores aportando además unas pautas para su implementación práctica. Estos autores completarían este primer estudio en Cartenì y de Luca (2012).

Gharehgozli *et al.* (2014 y 2016) proponen una nueva revisión de las técnicas de investigación operativa en terminales marítimas de contenedores, destacando nuevas tecnologías y áreas emergentes de investigación, pero donde la utilización de técnicas DES siguen estando presentes y de plena actualidad.

Estos estudios complementan al buen trabajo de recopilación actualizada que se encuentra recogido en la serie Carlo *et al.* (2014a, 2014b y 2015) donde progresivamente se ocupan de los modelos en la zona de almacenamiento (Carlo *et al.*, 2014a), en las operaciones de transporte de muelle a zona de depósito (Carlo *et al.*, 2014b) y, finalmente, en el propio muelle (Carlo *et al.*, 2015).

3.3 Simulación mediante técnicas basadas en agentes o ABS.

Si bien los sistemas ABS son anteriores a esta década, la proliferación de estas técnicas en diferentes sectores de actividad data de finales de los años 90 tal y como se vera a continuación.

Efectivamente, primero en Macal y North (2013) y más tarde en Macal (2016) en unos interesantes artículos en los que describen los aspectos básicos de las técnicas ABS, presentan unas tablas con los artículos más relevantes en diferentes áreas de actividad¹⁷⁶.

¹⁷⁶ Dentro de estos sectores citan el de investigación de la cadena de suministro (Swaminathan *et al.*, 1998, Van Dam *et al.*, 2008 y Chen *et al.*, 2013); procesos inteligentes de fabricación (Shen y Norrie, 1999; Monostoria *et al.*, 2006 y Leitão, 2009); utilización del suelo (Parker *et al.*, 2003); vida artificial y ciencias cognitivas (Bedau, 2003); finanzas (LeBaron, 2005 y Bookstaber, 2012);

Tal y como pone de manifiesto Macal (2016) los campos de actividad en que se han aplicado los sistemas ABS son muy amplios y, más importante, crecen día a día.

Como no podía ser de otra forma, la industria marítima y portuaria ha visto como la simulación mediante ABS también ha sido importada con éxito a su campo, donde sus características de complejidad, relaciones no lineales entre diferentes actores y dinamismo de los mismos la hacen especialmente aplicable.

El objetivo de este apartado es dar repaso a cómo y con qué alcance estas técnicas se han ido implementando en la gestión de puertos y terminales, citando las realizaciones más relevantes que se han encontrado en las tareas de revisión bibliográfica y documental.

3.3.1 Antecedentes de utilización de técnicas ABS en puertos.

Los antecedentes de la utilización de sistemas ABS en puertos y terminales seguramente se pueda encontrar en la introducción de técnicas multiagente (*Multi-Agent-Systems* o “MAS”) en los campos de fabricación y gestión de almacenes y cadena de suministro o en la optimización de rutas marítimas.

Dentro del primer campo referido en el párrafo anterior, primero Sauve y Collinot (1987) y siguiendo sus pasos Norrie *et al.* (1989a, 1989b y 1990) y Guo *et al.* (1990) habían introducido los ABS en el campo de la fabricación industrial con el objetivo de minimizar los stocks.

Towill *et al.* (1992) harían lo propio para la aplicación de políticas *just-in-time* que redujesen los niveles de almacenamiento y el efecto de amplificación de la demanda (conocido en logística como el “*bullwhip effect*” tal y como ya lo había definido Forrester, 1961 en su libro *Industrial Dynamics*).

transporte (Conway, 2006 y Bernhardt, 2013); economía (Tsfatsion y Judd, 2006; Farmer y Foley, 2009 y Hamill y Gilbert, 2016); psicología y comportamiento humano (Smith y Conrey, 2007 y An, 2012); antropología (Griffin y Stanish, 2007); biomedicina e investigación y desarrollo en el ámbito de empresas farmacéuticas (Folcik *et al.*, 2007 y Hunt *et al.*, 2013); ecología (Mock y Testa, 2007 y Grosman *et al.*, 2011) criminología (Malleon 2007, 2008, 2009, 2010 y Malleon *et al.* 2010); energía (Zhou *et al.*, 2007; Van Dam *et al.*, 2008; Wittmann, 2008; Jackson, 2010 y Chen *et al.*, 2012); políticas y planificación medioambiental (Zellner, 2008); geografía y análisis geoespacial (Crooks *et al.*, 2008; Heppenstall *et al.*, 2012 y Crooks y Heppenstall, 2012); epidemiología y enfermedades infecciosas (Auchincloss y Diez Roux, 2008; Epstein, 2009; Aleman *et al.*, 2010; y Parker y Epstein, 2011 y Frias-Martínez *et al.*, 2011); redes sociales (Menges *et al.*, 2008); agricultura (Leyk *et al.*, 2009); respuesta ante catástrofes y asistencia humanitaria (Puckett, 2009 y Crooks y Wise, 2013); aplicaciones de teoría de colas o “*queueing*”¹⁷⁶ (Sankaranarayanan, 2011); marketing y análisis de mercado (Charania *et al.*, 2006; North *et al.* 2009; Kuhn *et al.* 2010 y Rand y Rust, 2011); ciencias de la salud (Luke y Stamatakis, 2012 y Maglio *et al.*, 2014); urbanismo y arquitectura (Chen, 2012); turismo (Balbi *et al.*, 2013 y Nicholls *et al.*, 2016); o arqueología (Lake, 2014; Wurzer *et al.*, 2015, Breiteneker *et al.* 2015, y Cegielski y Rogers, 2016).

No trata la lista presentada en este párrafo de ser una recopilación exhaustiva de todos los campos donde se ha aplicado los sistemas ABS ni todas las realizaciones específicas en cada uno ellos. Existen más campos y más referencias de las que se han incluido y simplemente se realiza un listado para ilustrar la gran diversidad de campos de aplicación. Se citan las referencias por orden cronológico atendiendo a los artículos más destacados y pioneros en cada uno de los campos citados.

Kwok y Norrie (1993) trabajan con su simulación en el comportamiento de vehículos automáticos (AGV's) en almacenes y para ello adoptan un modelo MAS apoyándose en el lenguaje Smalltalk-80.

Una buena recopilación de estos trabajos previos en este campo se pueden encontrar en Saxena (1996) quien realiza una completa tesis en relación a políticas de despacho dentro de un sistema de fabricación flexible.

En lo que se refiere a la segunda línea de investigación (optimización de rutas marítimas), Buchheit *et al.* (1992) trabajan en el marco de un proyecto conjunto de varias compañías navieras que tratan de optimizar sus operaciones buscando sinergias entre ellas. Así, estas compañías se plantean cooperar para obtener unos mejores resultados operativos que los que podrían obtener de trabajar de una manera aislada. Buchheit y el resto del equipo formulan una plataforma multi-agente (llamada MARS: *Modeling a Multi-Agent Scenario for Shipping Companies*) que permite modelizar el movimiento de contenedores en terminales, maximizando los resultados e incrementando la eficiencia bajo la aplicación de ciertas políticas y estrategias de cada una de las compañías, pero permitiendo colaboraciones y mejoras allá donde pueden plantearse.

Una descripción mucho más detallada del proyecto MARS se incluye en Fischer y Khun (1993) si bien estos autores no lo aplican al caso portuario sino a un sistema de transportes multimodal mucho más amplio incluyendo las fases terrestres de la cadena de transporte.

Swaminathan *et al.* (1998) realizan también una modelización de la cadena de suministro utilizando de igual modo técnicas multi-agente. Estos autores incorporan en su modelo los diferentes agentes del proceso (cada uno de los elementos individuales de la cadena de suministro como productores, transportistas, almacenistas,...), sus elementos de control (política de inventarios) y la interacción entre los mismos (mensajes entre unos y otros).

En la conceptualización del modelo utilizan cadenas de suministro de diferentes sectores, identificando los agentes que intervienen y dándoles un conjunto de elementos de control que les ayudan a tomar las decisiones más apropiadas aplicando determinadas políticas¹⁷⁷ sobre los elementos de oferta, demanda, sistemas de información y control de materiales dentro de la cadena de suministro.

Estos autores combinan la modelización mediante simulación con la aplicación de modelos analíticos lo que les dota de un armazón adecuado para estudiar problemas tanto estáticos como dinámicos.

¹⁷⁷ Políticas que se derivan de modelos analíticos de gestión de inventarios, procesos *just-in-time* o algoritmos de evaluación de rutas.

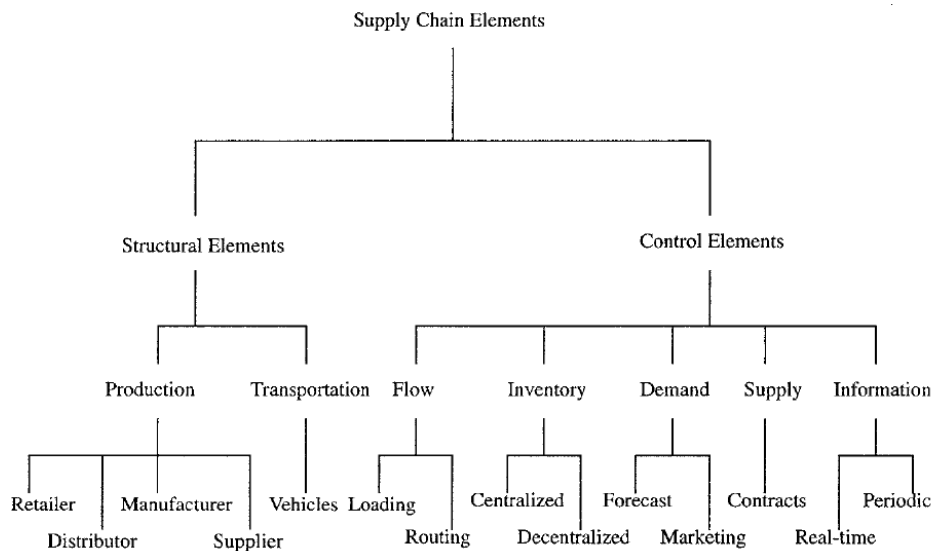
Tal y como se aprecia en la ilustración 43, bajo su modelo, los puertos pueden ser invocados como un centro de distribución más (“*distributor*”) al que llegan los productos desde los centros de producción (“*manufacturer*”), otro suministrador (“*supplier*”) u otro centro de distribución y donde se toma la decisión de almacenarlos y posteriormente expedirlos al siguiente punto de distribución o consumo (“*retailer*”).

Se adopta como política del sistema la de minimización del inventario y maximización del volumen de mercancía manipulada (política que con criterio general coincide con el interés de todo gestor portuario en términos de productividad).

Cuando la orden al puerto proviene de otro centro de distribución, fabricante o suministrador se entiende que la mercancía llegaría a puerto y se procede a su almacenamiento (si existe sitio disponible); mientras que si la orden proviene de un centro de consumo se entiende que la mercancía sale de puerto (siempre que exista mercancía acopiada en el mismo).

Mediante los elementos de transporte (“*vehicles*”) las mercancías son transportadas dentro de la terminal o entre puntos de la cadena de suministro.

Ilustración 43: Elementos de la cadena de suministro en el modelo de Swaminathan *et al.* (1998).



Fuente: Swaminathan *et al.* (1998).

3.3.2 Utilización de técnicas ABS en puertos: recopilación de referencias bibliográficas y alcance de las mismas.

Gambardella *et al.* (1998) en uno de los artículos más citados en el campo de simulación portuario utilizan un sistema multi-agente en uno de los módulos (“*simulation*”) en los que dividen un

sistema DSS para una terminal de contenedores. Este módulo es el encargado de evaluar la robustez y validez de diferentes políticas aplicadas en la terminal y lo aplican a un caso de estudio para la terminal de contenedores de La Spezia (Italia) de interés no sólo académico sino práctico, centrando la investigación en las políticas de asignación de recursos dentro de la terminal.

Los autores trabajan sobre las bases marcadas con anterioridad por Gambardella *et al.* (1996), Bontempi *et al.* (1997) y Rizzoli *et al.* (1997) presentando una arquitectura modular simple para la construcción de modelos portuarios que después ha sido replicada por otros autores y que seguramente se inspiraba en el modelo *MIT Simulator* de E. Frankel (Frankel, 1987).

Esta arquitectura se basa en un primer módulo donde se genera la demanda durante todo el periodo que dure el paso de la simulación (“*forecasting*”), un módulo donde se describe el sistema y establecen las relaciones que rigen las interrelaciones entre sus agentes y se programan los algoritmos de asignación de órdenes y prioridades (módulo de “*planning*”) y uno último donde con los resultados de los dos anteriores se realiza la simulación propiamente dicha (modelo “*simulation*”).

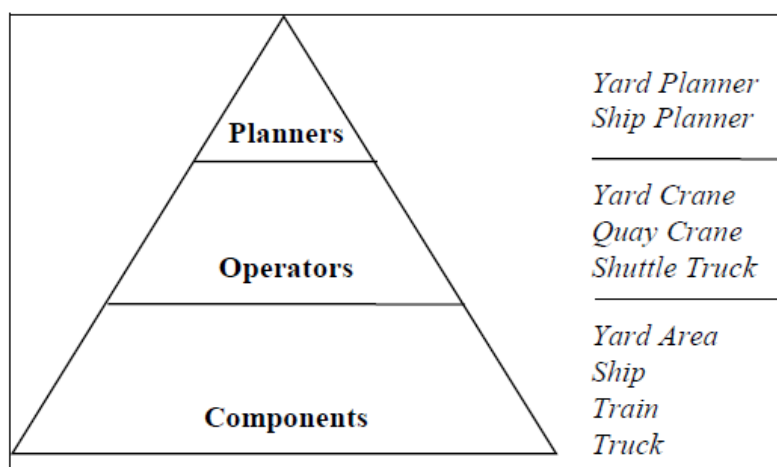
Estos módulos se van presentando secuencialmente en Gambardella *et al.* (1996) (módulo *forecasting*), Bontempi *et al.* (1997) (módulo *planning*) y Gambardella *et al.* (1998) (módulo de simulación).

Para estos autores, los agentes interactúan entre ellos intercambiando información, tomando sus propias decisiones en función del conocimiento que tienen sobre sus propias acciones en respuesta de las acciones del resto de agentes.

Quizá, una de las mayores aportaciones de los autores haya sido la definición de una estructura piramidal jerárquica de diferentes agentes que actúan en una terminal; pirámide que con diferentes nombres ha sido utilizada por la mayoría de autores posteriores. En efecto, distinguen tres niveles diferentes de agentes que actúan en la terminal desde un nivel superior (que denominan “*planners*”) y que tienen que ver con los procesos de planificación de espacios de la terminal y de las operaciones de los barcos (que denominan respectivamente “*yard planner*” y “*ship planner*”); un nivel intermedio u operacional en el que estarían las grúas de patio, muelle y los elementos de transporte interno de contenedores (“*yard crane*”, “*quay crane*” y “*shuttle truck*”) quienes tienen un conocimiento local que les permite movilizar los contenedores evitando conflictos entre los medios (por ejemplo dos grúas de patio compitiendo por poner su contenedor en el mismo espacio) y un nivel más bajo en la pirámide que reservan a los propios componentes como son el patio de contenedores, el barco, el propio contenedor, el tren o los camiones que traen/sacan los contenedores al/del puerto (“*yard area*”, “*container*”, “*ship*”, “*train*” y “*truck*” respectivamente).

Todos estos elementos tienen en común que no son controlados por el operador de la terminal y su comportamiento, aunque sea también “inteligente”, viene determinado por terceros agentes y, por tanto, se consideran más como *inputs* del sistema generados en otros módulos. Dicha estructura queda reflejada en la ilustración 44.

Ilustración 44: Pirámide jerárquica de agentes que actúan en una terminal de contenedores.



Fuente: Gambardella *et al.* (1998).

Más tarde, Rebollo *et al.* (2000) sigue la línea de Gambardella *et al.* (1998) y ayudan a sentar las bases metodológicas para posteriores desarrollos MAS en puertos. Estos autores no desarrollan (o al menos no se evidencia en su artículo y en la posterior búsqueda realizada en el marco de este trabajo) una aplicación práctica concreta (algo que sí que habían hecho Gambardella *et al.*, 1998) y si bien indican que el modelo está en fase de implantación no se ha localizado ningún ejemplo de su explotación con posterioridad.

Sin embargo, como quiera que dicha construcción teórica ha tenido gran difusión (al menos en términos de citación) y ha influido en otros trabajos (especialmente los de Lawrence Edward Henesey que luego se describirán) se incluyen a continuación con cierto grado de detalle.

Estos autores empiezan por definir cuatro sistemas dentro de una terminal de contenedores:

- 1) Interface marítima (conexión entre barcos y muelle y punto de entrada y salida de contenedores por mar);
- 2) Interface terrestre (puerta de entrada y salida de contenedores a la terminal por tierra);
- 3) Sistema de transferencia (movimientos internos de contenedores desde/hacia el barco hacia/desde el patio); y
- 4) Sistema de almacenamiento (patio de almacenamiento de contenedores).

En la interface marina se definen los planes de estiba de los barcos y la asignación de atraque (BAP) y se llevan a cabo las tareas de asignación de grúas de muelle (QCAP) y su posterior programación de trabajo (QCSP).

En el sistema de transferencia los autores definen los procesos de recorrido (“*routing*”) de los medios de transporte horizontal y selección de contenedores a ser transportados (“*pickup sequencing problem*”).

Por su parte, en el sistema de almacenamiento los autores contemplan los problemas de diseño de la configuración del patio (asignación de *slots* en el patio a determinadas bodegas de barcos que, posteriormente, determinarán la asignación de medios para transportar y el subsiguiente plan de carga/descarga) y asignación automática de contenedores (el sistema asigna un *slot* al contenedor en el patio en función de sus datos intentando minimizar las posteriores remociones).

Bajo estas bases metodológicas los autores estructuran una arquitectura basada en cinco tipos de agentes: barcos (“*Ships Agents*”), estibadores que controlan las grúas de muelle (“*Stevedore Agent*”), *transtainers* encargados del movimiento horizontal (“*Transtainer Agent*”), servicio en patio (“*Service Agent*”) que asignan espacios a los contenedores en el patio y puerta (“*Gate Agent*”).

Estos agentes trabajan bajo sus propias rutinas (algoritmos contruidos para alcanzar los objetivos definidos) e interactúan intercambiando información y órdenes de trabajo.

Degano y Pellegrino (2002) combinan algoritmos basados en Redes de Petri con sistemas MAS, definiendo unos agentes en ciclos de operación que denominarán “*export*”, “*import*” y “*transshipment*” también en una terminal intermodal de contenedores que contrastan con un experimento aplicado a la terminal Voltri Terminal Europa (Génova, Italia).

Thurston y Hu (2002) son quizás los que introducen los MAS en el campo de la programación de operaciones de grúas de muelles (“QCSP”) alimentados por una flota de AGV’s. Para ello definen dos agentes físicos (QCA’s y SCA’s de “*Quay Crane Agent*” y “*Straddle Carrier Agents*”) y otros dos virtuales: “*Traffic Agent*” y “*Manager Agent*” el primero encargado de determinar las rutas de los AGV’s impidiendo colisiones y optimizando los recorridos y el segundo encargado del flujo e intercambio de comunicación entre los diferentes agentes sirviendo de suerte de “agregador”. El enfoque de estos autores es exclusivamente centrado en la fase de carga de los barcos. Estos autores lo realizan sobre primeros prototipos de Java y según Winikoff *et al.* (2011) era un trabajo que no reportaba datos experimentales completos y que según manifestaba los propios autores no fue continuado.

Tras estos primeros experimentos en campo portuario se pusieron en marcha proyectos mucho más ambiciosos. Sinha-Ray *et al.* (2003) de la Universidad de Bristol (Reino Unido) en un

proyecto denominado “*Container World*” trataron de modelizar mediante arquitecturas MAS un complejo sistema de funcionamiento del mercado de contenedores en el Reino Unido. Para ello concibieron una aproximación macroscópica que se estructuraba en realidad en tres modelos diferentes, cada uno con vocación de funcionar independientemente en PC’s diferentes, pero con capacidad de alimentar uno con los resultados y datos del otro.

- El primer modelo que denominaron ITM (“*International Trade Model*”) es el único que según las investigaciones desarrolladas en el marco de esta tesis llegó a desarrollarse (quedando en proceso de validación) y trataba de reflejar el movimiento de contenedores en todo el mundo utilizando como agentes a las compañías navieras, puertos, barcos portacontenedores y el que denominaban “*Super-Delegate*”; agente que representaba a los intereses del conjunto de compañías y que se encargaba de introducir o sacar contenedores del sistema una vez que respectivamente los mismos eran embarcados desde un puerto o desembarcados a un puerto (saliendo por tanto del sistema ITM).
- El segundo modelo correspondía al propio sistema de distribución de contenedores en el Reino Unido y lo denominaban UKCM (“*United Kingdom Competition Model*”) incluyendo agentes tales como compañías navieras, puertos y terminales, operadores logísticos, operadores ferroviarios, etc... y en el mismo se incluían las negociaciones entre los agentes anteriores y se programaban sus diferentes interacciones y estrategias de negocio (cada operador tenía sus nodos de actuación, zonas de almacenamiento y distribución, objetivos y presencia regional,...). Cada unidad tendría sus propios objetivos y respondería según sus propios intereses creando un verdadero “ecosistema”.
- El tercero modelo que denominaban IDM (“*Inland Distribution Model*”) pretendía ser el modelo por el que los contenedores físicamente se distribuían por todo el Reino Unido; para ello se utilizarían como agentes los propios barcos de cabotaje o *feeder*, los trenes y los camiones que hacían la distribución junto con los oportunos operadores logísticos. Se pensaba en un sistema nodal donde se modelizaban los puntos de concentración y distribución de contenedores (interiores o marítimos) y se representaban físicamente las redes de transporte (carreteras y ferrocarriles).

Se trata éste de un proyecto que quedó en el plano teórico, ya que en realidad si bien el primer modelo (ITM) si llegó a escribirse y explotarse en fase de pruebas no se ha podido encontrar evidencias de que los otros dos (UKCM e IDM) fueran nunca desarrollados y menos acoplados. Se cita, no obstante, para reflejar como un sistema MAS puede ayudar a resolver problemas “macro” complejos con tal cantidad de agentes que otras aproximaciones son prácticamente inviables.

Si bien y como se acaba de ver no es el primer autor que utiliza estas técnicas, la utilización de sistemas MAS en puertos ha venido muy impulsada en los últimos años por el intenso trabajo

publicado por Lawrence Edward Henesey junto con sus colegas y en algún caso alumnos del Departamento de Sistemas y Software de la *School of Engineering del Blekinge Institute of Technology* (Karlskrona, Suecia).

Como más claro referente podría destacarse su tesis doctoral (Henesey, 2006b), que no deja de ser el remate de una extensa colección de artículos de este autor (en solitario o como coautor junto a otros investigadores) dedicados a la aplicación de sistemas MAS o ABS en puertos y que materializa en un modelo de propósito específico para terminales de contenedores (extrapolable a cualquier terminal) que denomina bajo el nombre **SIMPORT** y que más tarde se describirá sucintamente.

Por citar algunas otras referencias de este autor (junto sus colegas o alumnos) se podrían señalar Henesey y Törnquist (2002), Henesey (2002, 2003, 2004a y 2004b, 2006a, 2006b), Henesey *et al.* (2002, 2003a, 2003b, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d, 2007, 2008, 2009a y 2009b), Davidsson *et al.* (2005a y 2005b), Henesey y Persson (2006), y, finalmente, Bakht y Ahmad (2008)¹⁷⁸.

Sin necesidad de entrar en todos ellos se citarán algunos como referencia. Se hará por orden cronológico centrándose en aquellos más relevantes o novedosos.

No se puede afirmar cual es el primero, pues ya en el año 2002 Lawrence Edward Henesey publica (sólo o en compañía de otros) al menos cuatro artículos sobre la materia; pero si se puede mencionar como la base de todos ellos es el que publica junto con J. Törnquist en Henesey y Törnquist (2002) .

En este trabajo, los autores retoman los estudios que el último de los firmantes junto con P. Davidsson (ambos también del *Blekinge Institute of Technology* de Karlskrona, Suecia) están haciendo en el marco de la optimización de los ferrocarriles suecos y que vienen referenciados en Törnquist y Davidsson (2002) y de otros con carácter más generalista (no relacionados con puertos sino en relación a lo que denominan *resource allocation problem*) recopilados en Johansson *et al.* (2000), Johansson *et al.* (2002), Davidsson y Johansson (2002) y Davidsson *et al.* (2003).

Para estos últimos autores las ventajas de adoptar modelos mediante técnicas ABS en cualquier problema de asignación de recursos (frente a otros sistemas clásicos de optimización) se basan en la capacidad de los modelos ABS de resolver problemas de gran escala mediante técnicas de discretización lo que permite una resolución óptima en términos de tiempo de resolución, estabilidad computacional y robustez del sistema y con ello su capacidad para implementar cambios en el modelo mediante una aproximación dinámica.

¹⁷⁸ Estos autores son alumnos del Departamento de Sistemas y Software de la *School of Engineering del Blekinge Institute of Technology* (Karlskrona, Suecia) donde imparte docencia L.E. Henesey.

Sobre las bases desarrolladas en estos estudios, Törnquist y Davidsson (2002) aprovechan para hacer evolucionar el modelo puramente ferroviario hacia una adaptación a una terminal de contenedores en el que el núcleo pasa por modelizar la interface ferrocarril – puerto.

Para ello definen una arquitectura multi-agente en el que existen un total de 6 agentes: 1) ferrocarril (“*Rail Agent*”); 2) camiones de transporte (“*Lorry Agent*”); 3) puerta de entrada o interface propiamente dicha (“*Gate Agent*”); 4) planificador de patio (“*Yard Planner Agent*”); 5) planificador de barcos (“*Ship Planner Agent*”); y 6) barcos (“*Vessel Agent*”).

Todos estos agentes son capaces de comunicar e intercambiar información y desarrollar sus propias actividades en función de objetivos prefijados (cada agente tiene una subrutina de cálculo que le permite tomar las decisiones más oportunas para cumplir sus objetivos). Así, a la llegada del tren a la terminal, el *Rail Agent* transmite al *Gate Agent* cierta información sobre el contenido de la carga que lleva (contenedores que transporta con todos sus atributos de identificación: peso, dimensiones, tipo de carga, etc.).

El *Gate Agent* comunica con el *Yard Planner Agent* (quien calcula el mejor sitio para depositar los contenedores y vuelve a transmitírselo al *Gate Planner*) y al *Ship Planner Agent* (quien coordina la futura carga con el plan de estiba establecido).

Con la información de posicionamiento el *Gate Agent* vuelve a transmitir información tanto al *Rail Agent* como al *Lorry Agent*; procediéndose al depósito del contenedor en el sitio adecuado. Mientras tanto, el *Ship Planner Agent* y el *Ship Agent* han intercambiado la información sobre el número de contenedores a cargar y/o descargar, procediendo a hacerlo a la llegada del buque.

De interés es también Henesey *et al.* (2003b). Aquí los autores comienzan por realizar una interesante revisión bibliográfica del estado de aplicación de los sistemas MAS en entornos portuarios citando los trabajos de Buchheit *et al.* (1992); Gambardella *et al.* (1998); Rebollo *et al.* (2000); Degano y Pellegrino (2002) y Thurston y Hu (2002), y evidenciando el poco desarrollo que habían experimentado estas técnicas en puertos en comparación a otros modos de transporte (aéreo, ferrocarril, etc...).

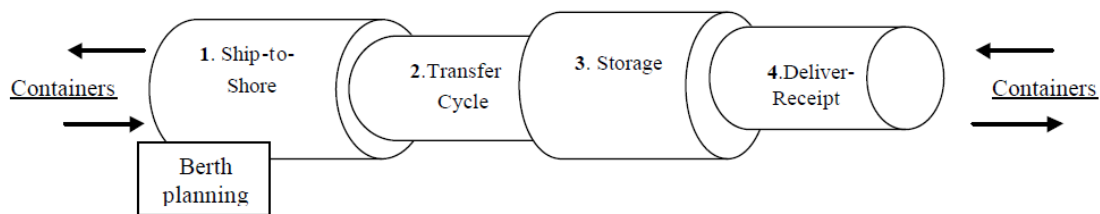
A partir de aquí desarrollan un poco más el modelo teórico presentado en Henesey y Törnquist (2002) y descomponen la terminal en una serie de subsistemas (Ilustración 45) y describen cuales son los agentes que ellos consideran relevantes. Conceptualmente dividen éstos en:

- Agentes globales (barco o “*ship agent*”, muelle o “*berth agent*”, patio o “*yard agent*” y puerta de entrada de la terminal o “*gate agent*”); y,
- Agentes “*utility*” (grúa de muelle o “*crane agent*”, grúa de patio o “*transtainer agent*” y vehículos de transporte de contenedores dentro de la terminal o “*transport agent*”).

A su vez distinguen diferentes actividades que se llevan a cabo dentro de la terminal:

- 1) Asignación de espacios en el patio para el depósito de contenedores de exportación;
- 2) despacho de contenedores de exportación desde la terminal a barco;
- 3) asignación de espacios en el patio para el depósito de contenedores descargados (contenedores de importación o transbordo); y,
- 4) despacho de contenedores de importación desde el patio a la puerta de la terminal y reasignación de contenedores después de una decisión de atraque.

Ilustración 45: Subsistemas dentro de una terminal de contenedores.



Fuente: Henesey *et al.* (2003b)

Como se puede observar, estos autores hacen evolucionar el modelo desde su antecesor en el que la esencia era la interface ferrocarril – terminal (Henesey y Törnquist, 2002) a otro en el que otros elementos de la terminal no tratados en el modelo anterior cobran protagonismo (grúas, elementos de transporte horizontal, etc...).

En el modelo de Henesey *et al.* (2003b) cada uno de los agentes interactúa con los otros siguiendo determinadas reglas y transfiriendo a otros agentes un coste por sus acciones (coste que el agente puede aceptar o rechazar en función de su propia experiencia, objetivos y si la decisión de asumir ese coste es la mejor de entre las que puede tomar). Una representación esquemática de esta interacción entre agentes y transferencia de costes se observa en la ilustración 46.

Ilustración 46: Esquemas de interacción entre agentes y traspaso de costes entre agentes.

Fig. 3: The yard agent has a cost for receiving a container.

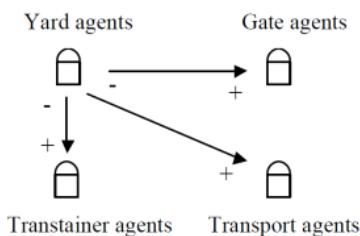


Fig. 4: The berth agent has cost for making the containers available for loading onto a ship.

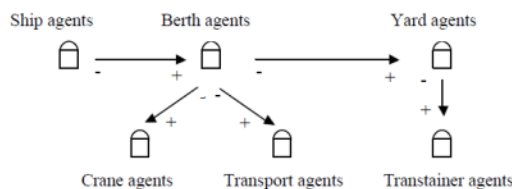
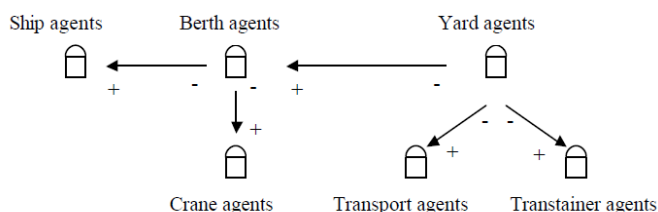
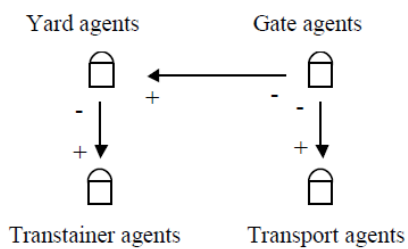


Fig. 5: The yard agent has a cost for receiving a container



The gate agent has expenses for making a container available for dispatch from the terminal.



Fuente: Henesey *et al.* (2003b).

Siguiendo con la evolución, Henesey *et al.* (2004) abordan el BAP construyendo un modelo para apoyo a la asignación de atraques que codifican en Java y que denominarán BAMS (“*Berth Allocation Management System*”) y que es el antecesor del más evolucionado modelo MAS que más tarde será descrito en Hanesey (2006a) bajo el nombre de SIMPORT (acrónimo de “*SIMulated container PORT*”).

En SIMPORT (primer modelo de propósito específico que utiliza el paradigma ABS en puertos) las entidades son modeladas como un sistema computacional de diversos agentes que son capaces de comunicarse entre sí con el objetivo de conseguir un objetivo común.

Tal y como lo describe su autor, SIMPORT ayuda al gestor portuario en tiempo real (se trata realmente de un DSS al que se le puede dar forma de TOS) a adoptar las decisiones y políticas óptimas de cómo se debe abordar la operación conjunta de un barco y una terminal (ordenamiento del patio de contenedores y asignación de posición en el mismo, políticas de apilamiento de contenedores, asignación de atraques, etc.).

El modelo considera todas las entidades físicas (grúas, muelles, atraques, equipo de transporte y manipulación, contenedores y barcos) y representa las entidades de decisión y relación entre ellos (programación de atraques, medios terrestres y grúas, tiempos de espera,...).

De manera práctica con SIMPORT se puede analizar por ejemplo la óptima asignación de atraques ante la llegada de una serie de buques en consideración del estado del patio y las políticas de apilamiento de la terminal.

En la tabla 11 se compilan las reglas, objetivos y tipos de agentes que considera SIMPORT. En el modelo, cada uno de los agentes toma sus propias decisiones en función de la información y mensajes que recibe de los otros. El nivel de inteligencia de los agentes puede ser considerado por tanto reactivo (una acción específica se ejecuta como respuesta de la información recibida de otro agente).

Tabla 11. Definición de agentes, roles y objetivos de los mismos en el modelo SIMPORT.

Agentes / Actores	Roles	Objetivos
Organizador de programa de barcos	Búsqueda constante de llegada de barcos y asignación de atraque en la terminal.	Programación de atraques bajo determinadas políticas.
Estibador	Comunicación entre el agente “barco” y el agente “terminal”.	Dar servicio al agente “barco” con mínimo coste.
Barco	Comunicar su demanda al agente “estibador”.	Asegurar que el tiempo de operación es tan rápido como sea posible y minimizar el coste de barco atracado en muelle.
Straddle Carrier	Mover contenedores desde el muelle hasta la zona de almacenamiento y comunicarse con el agente “estibador” y el agente “grúa”.	Mover los contenedores dentro de la terminal tan rápidamente como sea posible asegurando que la grúa no permanezca inactiva.
Grúa	Carga / Descarga de contenedores desde los barcos y comunicarse con el agente “estibador” y el agente “straddle carrier”.	Cargas/descargar contenedores del barco tan rápido como sea posible alimentando los <i>straddle carriers</i> con contenedores.
Terminal	Asignar grúas y actuar como el “manager” global del modelo.	Uso eficiente de todos los recursos de la terminal mientras se está sirviendo un barco. Tratar que la operación de la terminal sea rentable.

Fuente: Hanesey (2006a).

En la ilustración 47 se muestra la arquitectura de SIMPORT y la conceptualización de los procesos y las comunicaciones y procesos de coordinación entre los distintos agentes.

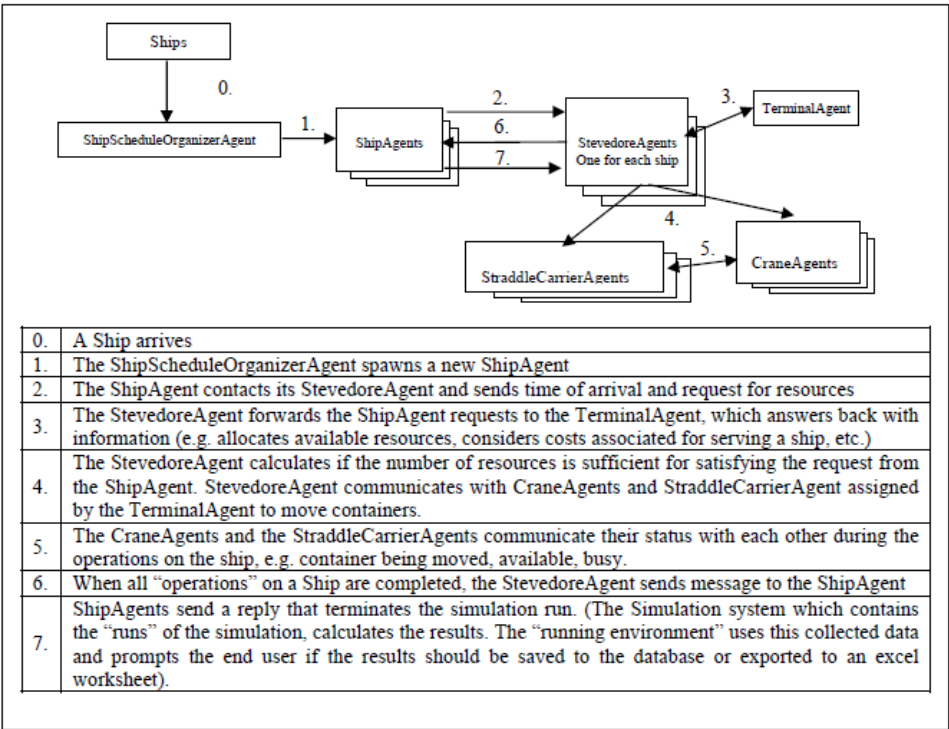
Se observa como a la llegada de un barco a terminal el agente “organizador de programa de barcos” genera un agente “barco” que llama al agente “estibador” pidiéndole recursos, remitiéndoselos éste al agente “terminal” quien le responde con los recursos disponibles y el coste asociado.

Con esta información el estibador calcula el número de recursos que necesita para satisfacer el requerimiento que le ha lanzado el barco, comunicando además con los agentes “straddle carriers” y “grúas” para que procedan a comenzar el trabajo. Durante la operación estos dos últimos agentes tienen que comunicarse continuamente para conocer el estado (ocupado u ocioso).

Cuando toda la operación ha terminado (el barco ha sido servido) el agente barco vuelve a mandar un mensaje al “estibador” quien procede a comunicar con el resto de agentes para terminar el

proceso. Durante el mismo, todos los resultados se van registrando en una base de datos que es la que permite con posterioridad evaluar el rendimiento global del proceso.

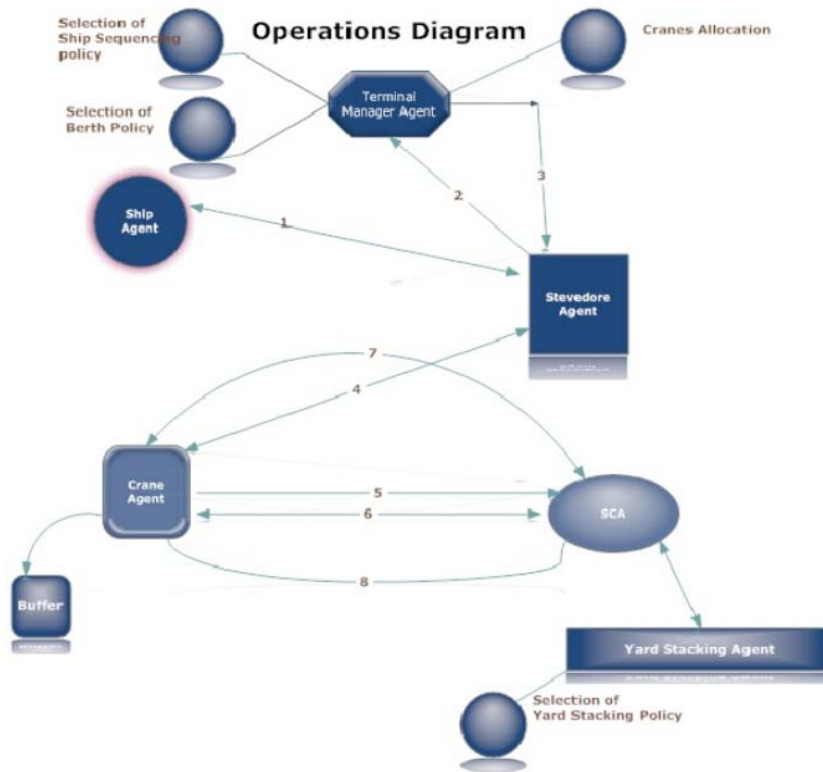
Ilustración 47: Arquitectura del modelo SIMPORT.



Fuente: Hanesey (2006a).

Igualmente comprensivo resulta el diagrama de operaciones que alumnos del *Blekinge Institute of Technology* (Karlskrona, Suecia) presentan en su Master Tesis para obtención de grado en la facultad de informática (Bakht y Ahmad, 2008), cuyo esquema se reproduce en la ilustración 48.

Ilustración 48. Diagrama de operaciones de SIMPORT.



Fuente: Bakht y Ahmad (2008).

Volviendo al artículo original, Hanesey (2006a) contrasta el modelo con datos reales de una terminal de India (sin citar de cuál se trata) y en la misma analizan distintas políticas de gestión dentro de la terminal como son:

- Políticas de prioridad de atraque: Considerando un sistema FIFO y comparando resultados con otro que denominan HEF “*Highest Earning First*” que se basa en dar prioridad de atraque a aquel barco que tienen previsto realizar más movimientos en la terminal (es decir aquel que va a dejar más ingresos en la misma).
- Políticas de asignación de atraque: Analizando un sistema BSCP (“*Berth closest to the Stack Policy*”) que se basa en asignar a un barco el atraque más cercano al área de depósito que se ha previsto para los contenedores que va a descargar (o más cercano al área donde están los contenedores que va a cargar) y STTP (“*Shortest ship Turn-down ratio Time Policy*”) que asigna atraque con objeto de minimizar el tiempo de estancia de un barco en puerto. El primero es por tanto un criterio “espacial” (no importa que el barco espere pues siempre le hará atracar lo más cerca posible del area de depósito designada) mientras el segundo es

“temporal” (no importa cuan lejos atraco el barco de la zona de depósito siempre que su tiempo de permanencia sea mínimo).

- Políticas de almacenamiento: que define como “*Ship Line*” (los contenedores se agrupan en función de la compañía naviera que los mueve) o “*Destination*” (los contenedores se agrupan en función de sus destinos sin importar que compañía los mueve).

Definidas estas reglas construye un total de 16 escenarios (combinando las diferentes políticas antes mencionadas) usando como indicadores de rendimiento de la terminal: 1) el tiempo de estancia del barco, 2) el coste de los recursos asignados en la operación; y, 3) las distancias totales recorridas por los vehículos de transporte interno.

Los resultados de los escenarios se presentan en la tabla 12.

Estos autores llegan a algunas conclusiones interesantes pero que, en esencia, confluyen en que distintas combinaciones de políticas dan resultados dispares sugiriendo una fuerte correlación entre las mismas y una gran complejidad del sistema. Así:

- Los mejores resultados en función de una menor distancia recorrida por los *straddle carriers* se dan como parece lógico en un escenario BCSP (concretamente en el BCSP-HEF-Des) pero no siempre un BCSP arroja mejores resultados en este parámetro (que es el que pretende minimizar) que una política STTP por la influencia de otras políticas (por ejemplo, un escenario STTP-FIFO-Des ofrece el segundo mejor resultado de los 16 escenarios analizados).
- Los mejores resultados en función de un menor tiempo de permanencia de barcos en puertos o del coste de operaciones los ofrece una política de asignación de atraques STTP (concretamente en el STTP-FIFO-Des antes mencionado) algo que siempre es cierto a igualdad de configuración de cargas en el modelo (los autores generan configuraciones de cargas en los barcos de una manera aleatoria “escenarios Aleatorios” o fija “escenarios Fija”).
- Los mejores resultados en función de un menor coste de operación se obtienen con políticas de asignación STTP frente a los BCSP. Así, de los 16 escenarios elegidos en los 8 de los 9 primeros, siempre es mejor este criterio, destacando el STTP-FIFO-Des-Fija, STTP-HEF-Des-Fija y STTP-FIFO-Des-Aleatoria. Lo que parece indicar que un criterio de almacenaje por destino es también mejor opción que un criterio por compañía.

Tabla 12. Resumen de resultados obtenidos mediante simulación por Henesey (2006a).

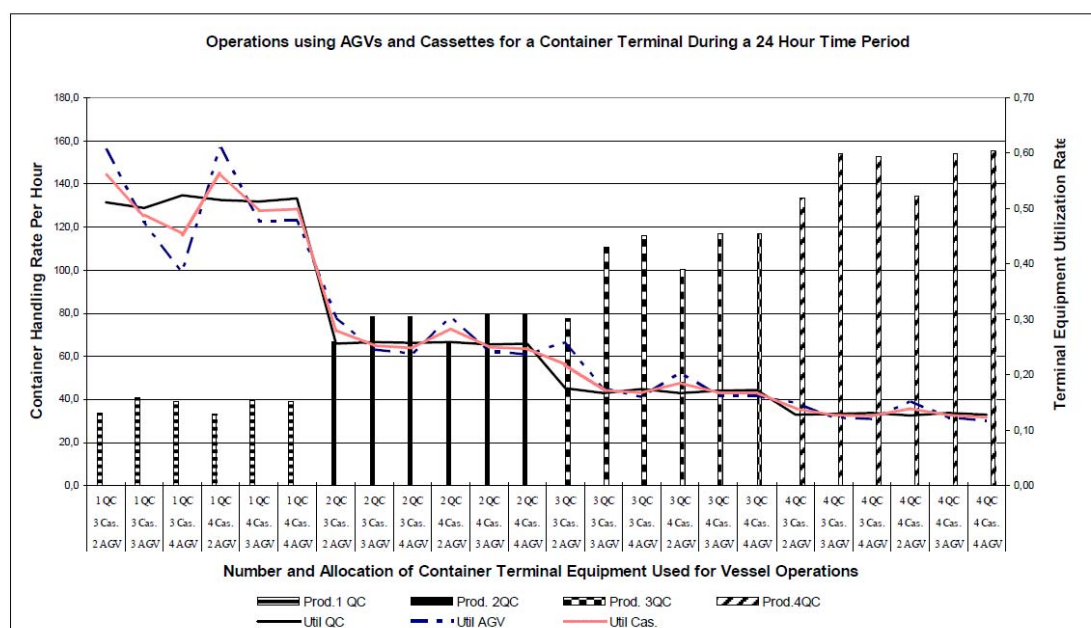
Nº Escenario	Políticas de gestión de la terminal			Escenarios de configuración de carga	Suma de distancias recorridas por los <i>Straddle Carriers</i> (metros)	Suma Tiempo de estancia de buques (hor:min)	Costes de Operación (€)
	<i>Política de Asignación de ataque</i>	<i>Política de Prioridad de Ataque</i>	<i>Política de depósito de contenedores</i>				
1	BCSP	HEF	Dest.	Aleatorio	2.760.759	44:07	226.500
2	BCSP	HEF	Dest.	Fija	2.698.905	42:03	221.755
3	BCSP	HEF	Ship line	Aleatorio	3.067.510	45:59	223.000
4	BCSP	HEF	Ship line	Fija	3.050.050	44:19	217.570
5	BCSP	FIFO	Dest.	Aleatorio	2.781.045	43:51	212.540
6	BCSP	FIFO	Dest.	Fija	2.753.205	42:45	200.220
7	BCSP	FIFO	Ship line	Aleatorio	3.090.050	44:15	220.200
8	BCSP	FIFO	Ship line	Fija	3.005.045	43:22	206.560
9	STTP	HEF	Dest.	Aleatorio	2.763.045	42:38	198.800
10	STTP	HEF	Dest.	Fija	2.725.450	41:28	185.040
11	STTP	HEF	Ship line	Aleatorio	3.070.050	43:07	205.550
12	STTP	HEF	Ship line	Fija	2.984.655	42:34	200.250
13	STTP	FIFO	Dest.	Aleatorio	2.763.045	42:31	196.800
14	STTP	FIFO	Dest.	Fija	2.704.050	41:10	180.750
15	STTP	FIFO	Ship line	Aleatorio	3.070.050	42:57	205.250
16	STTP	FIFO	Ship line	Fija	2.984.655	42:07	198.450

Henesey *et al.* (2006b) utilizan una técnica de simulación MAS para la optimización de los AGV's y *cassettes* necesarios en una terminal de contenedores bajo el criterio de que las grúas de muelle permanezcan el mínimo tiempo posible sin trabajo. Realizando diferentes simulaciones con distintos números de vehículos / *cassettes* determinan el ratio de utilización del equipamiento (tanto utilización de grúas, como los propios AGV's y *cassettes*) y los ratios de productividad de la terminal (calculados en TEU's / hora). El número de agentes de este modelo resulta menor que en casos anteriores (grúa, *cassette*, contenedor y AGV) y la propia arquitectura del modelo mucho más simple pues no trata tanto de ser un DSS para analizar la robustez de políticas sino simplemente una herramienta de dimensionamiento del equipamiento necesario en la terminal para dar resultados óptimos (para unas políticas determinadas).

En la ilustración 49 se observa como ejemplo los resultados obtenidos por estos autores. Obviamente, a mayor número de medios los ratios de productividad del puerto resultan más altos,

pero, los de actividad de los medios más bajos existiendo un punto de compromiso entre la productividad (número de medios a implantar y servicio percibido por el usuario) y su coste (introducción de coste de inactividad por sobredimensionamiento).

Ilustración 49: Resultados de los escenarios simulados.



Fuente: Henesey *et al.* (2006b).

SIMPORT, tal y como lo describen Henesey *et al.* (2006a), es una evolución del primer prototipo que bajo el nombre de BAMS (*Berth Allocation Management System*) es desarrollado en Henesey *et al.* (2004). Técnicamente SIMPORT fue desarrollado usando *MS Visual Studio 6.0* y utilizando el lenguaje de programación C++ para Windows.

Como limitación de esta primera versión los propios autores manifiestan que no son capaces de considerar operaciones de transbordo, algo que superan en una evolución posterior que presentan ese mismo año en Henesey *et al.* (2006d). El esquema de este estudio es ligeramente diferente al anterior en cuanto a los agentes utilizados y la arquitectura del sistema pero muy similar en cuanto a las políticas que someten a análisis.

En cuanto a arquitectura, Henesey *et al.* (2006d) definen un sistema en dos niveles:

- 1) Un modelo de la terminal ("*Terminal Model*") en el que se definen las características físicas de la misma y se describe su equipamiento. Así, se modelizan el número y longitud de muelles, dimensiones de los patios, equipamiento del muelle (número, tipo, capacidades y coste de las grúas), equipamiento de la terminal (número, tipo, capacidad y coste de elementos de transporte horizontal), etc..., y

- 2) Un modelo de gestión (“*Management Model*”) en el que se definen los agentes y sus relaciones.

Como agentes definen:

- 1) Un agente encargado de generar la llegada de barcos y aplicar las políticas de prioridad (“*Port Captain Agent*”);
- 2) Otro agente que es el propio barco con sus dimensiones y características (“*Ship Agent*”);
- 3) Un tercer agente que realiza la descarga/carga intentando de satisfacer los requerimientos del barco en cuanto a su estancia (“*Stevedore Agent*”) teniendo en cuenta la llegada esperada del barco y sus expectativas de salida en función de la próxima escala (es decir la flexibilidad del barco considerado para soportar esperas en función de la siguiente escala);
- 4) Un cuarto un agente que asigna atraque (“*Terminal Manager Agent*”) siguiendo alguna de las reglas de asignación que figuran en los párrafos siguientes;
- 5) Un quinto tipo de agentes compuesto por las propias grúas de muelle (“*Crane Agent*”); y,
- 6) Un último agente que son los propios vehículos de transporte horizontal con los que está equipada la terminal. (“*Straddle Carrier Agent*”).

A las ya mencionadas políticas de prioridad de atraque (FIFO y HEF) estos autores añaden una que denominan “SJF” (“*Shortest Job First*”) que trata de asignar atraque al barco que realizará la operación antes.

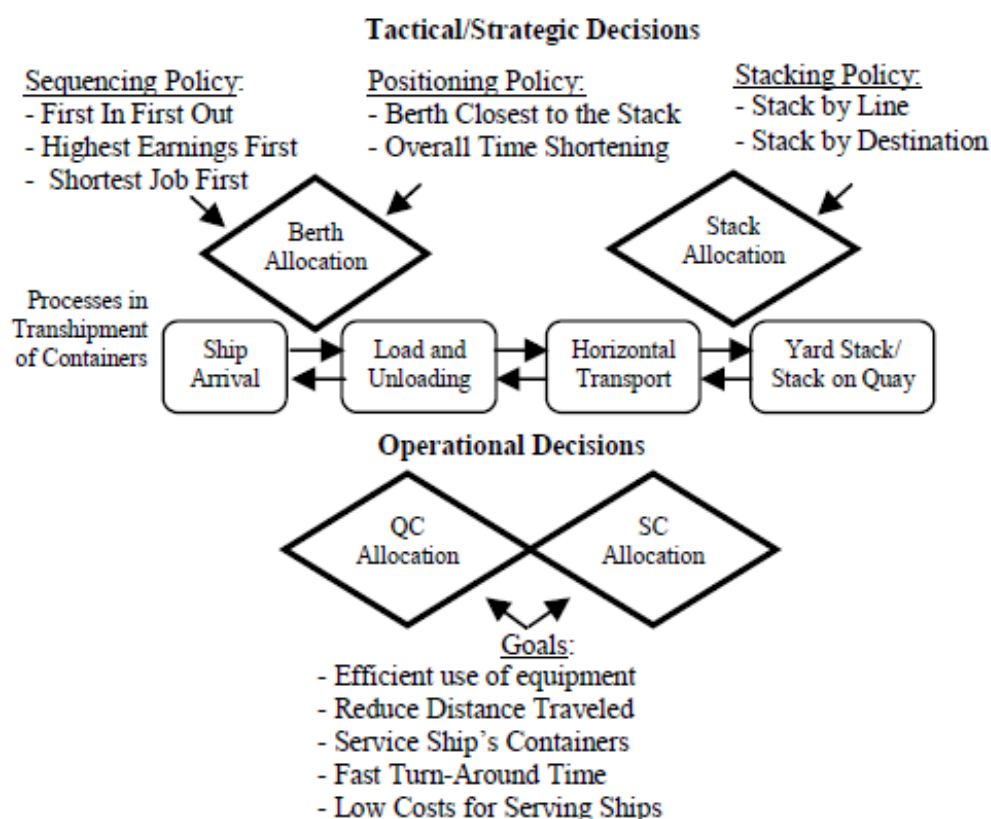
En cuanto a la política de asignación de atraque que en el estudio anterior denomina STTP aquí lo renombra como OTS (“*Overall Timer Shortening*”) pero es en esencia un término equivalente (política que también trata de minimizar el tiempo de estancia agregado de todos los barcos en puerto).

Siendo así presentan una arquitectura con:

- 1) Cuatro procesos de decisión claves: asignación de atraque, asignación de zona de almacenamiento, asignación de grúas de muelle y asignación de equipos de manipulación; respectivamente denominados “*Berth Allocation*”, “*Stack Allocation*”; *QC Allocation*” y “*SC Allocation*” (ilustración 50), y
- 2) Cuatro operaciones como son: la llegada de barco, la carga/descarga del mismo, el transporte horizontal de los contenedores desde barco a patio y el almacenamiento y manipulación en

patio; respectivamente denominados “*Ship arrival*”, “*Load and Unloading*”, “*Horizontal Transport*” y “*Yard Stack / Stack on Quay*” (ilustración 50).

Ilustración 50: Arquitectura del modelo MAS.



Fuente: Henesey (2006d).

Tal y como se observa en la tabla 13, Henesey *et al.* (2006d) generan un total de 24 escenarios en los que juegan con llegadas de barcos bien distribuidas (“*even*”) o en pico (“*peak*”) y altos grados de utilización del puerto (70%) (“*high*”) o bajos (50%) (“*low*”), llegando a la lógica conclusión de que los escenarios con llegadas en picos dan peor resultado en tiempos de estancia pero no necesariamente en tiempos recorridos y que el aumento de la ocupación incide negativamente tanto en las distancias como en los tiempos de estancias al ponerse de manifiesto mayores conflictos (por ejemplo necesidad de mayor número de remociones) y mayor escasez de medios.

Estos autores someten el modelo a un proceso de verificación y explotación en un caso real (terminal de 500.000 TEU’s en el Norte de Europa sin especificar cuál) llegando a conclusiones parecidas a la de estudios anteriores como el de Henesey *et al.* (2006a).

Utilizando como indicador la distancia total recorrida por los equipos terrestres; los mejores resultados, como es de esperar, se obtienen con una política BCTS (que trata precisamente de

situar el barco lo más cerca de la zona asignada a los contenedores que va a cargar/descargar, independientemente de que para ello el barco tenga que esperar a que se libere dicho atraque aun habiendo algún otro libre).

Por el contrario, utilizando como indicador el tiempo de estancia de los barcos los mejores resultados se obtienen con una política OTS (que asigna atraque tratando de minimizar el tiempo de estancia global en este caso aunque sea sacrificando la distancia recorrida por los equipos de transporte horizontal).

Por lo tanto, dependiendo de los objetivos de la terminal, el gestor debe inclinarse por una o por otra política (un objetivo puede ser minimizar el recorrido de los medios de manipulación que inciden directamente en el coste interno de la terminal u otro objetivo el de minimizar el tiempo de estancia de los buques que inciden en el coste de los clientes del puerto y en la percepción del servicio recibida).

Los mejores resultados absolutos en cuanto a distancias se consiguen con una combinación de políticas BCTS-FIFO resultando un poco mejor (aun cuando con poca relevancia) para esa combinación una política de almacenamiento por destinos que por compañías.

Los mejores resultados absolutos en cuanto a tiempos de estancia se consiguen con una combinación de políticas OTS-FIFO siendo totalmente irrelevante que se elija una política de almacenamiento por destinos que por compañías ya que los resultados son prácticamente idénticos.

Lo indicado en los dos puntos anteriores no debe interpretarse como que una asignación FIFO siempre arroja mejores resultados. En ciertos escenarios equivalentes las políticas SJB proporcionan mejores resultados en tiempo medio de estancia de barcos (por ejemplo en políticas OTS con llegadas bien distribuidas y altos grados de congestión, es decir OTS-even-high), mientras que las políticas HEF arrojan mejores resultados que las FIFO o SJB cuando el tráfico está bien distribuido y el grado de utilización del puerto es bajo, y se utiliza una política de asignación de atraque OTS (es decir en escenarios OTS-even-low). En estos casos la política de almacenamiento (por compañía o destino) se manifiesta poco determinante.

Tabla 13. Resultados de distintos escenarios con combinación de política de asignación de atraque, concentración de llegadas de barcos (“even”/“peak”) y grados de utilización del puerto (“high”/“low”).

Container Stacking by Destination						
Distribution / Load Vol.	BCTS			OTS		
	FIFO	HEF	SJB	FIFO	HEF	SJB
Total Distance Traveled by SCs (m)						
Even / Low	1438346	1439634	1439634	1589574	1465436	1575574
Peak / Low	1438738	1438738	1443134	1484434	1504510	1450344
Even / High	2041725	2038344	2043510	2331357	2131857	2199624
Peak / High	2049180	2049978	2048466	2155839	2123205	2048466
Average Ship Turn-Around Time (hh:mm)						
Even / Low	08:54	09:08	08:40	06:57	08:30	07:04
Peak / Low	11:37	11:55	11:51	08:36	09:40	08:33
Even / High	10:12	11:26	09:39	08:03	08:10	07:20
Peak / High	15:12	15:24	13:41	12:02	13:41	12:34
Max Turn-Around Time (hh:mm)						
Even / Low	15:30	15:30	15:30	12:38	12:38	12:32
Peak / Low	23:02	23:02	23:02	17:50	17:19	21:30
Even / High	23:04	23:05	23:04	15:11	18:02	19:17
Peak / High	23:06	23:14	21:30	23:08	22:59	23:05

Container Stacking by Ship Line						
Distribution / Load Vol.	BCTS			OTS		
	FIFO	HEF	SJB	FIFO	HEF	SJB
Total Distance Traveled by SCs (m)						
Even / Low	1445934	1445262	1440894	1 600 704	1475698	1586606
Peak / Low	1446928	1445934	1450358	1 494 822	1515052	1460494
Even / High	2051721	2048634	2053821	2 347 674	2146767	2215017
Peak / High	2059428	2063229	2058714	2 170 938	2138073	2060772
Average Ship Turn-Around Time (hh:mm)						
Even / Low	08:55	09:10	08:41	06:59	08:33	07:07
Peak / Low	11:39	11:57	11:53	08:38	09:43	08:36
Even / High	10:15	11:28	09:40	08:06	08:12	07:22
Peak / High	15:14	15:26	13:43	12:06	13:45	12:38
Max Turn-Around Time (hh:mm)						
Even / Low	15:30	15:30	15:30	12:38	12:38	12:32
Peak / Low	23:02	23:02	23:02	17:50	17:19	21:30
Even / High	23:04	23:05	23:04	15:11	18:02	19:17
Peak / High	23:06	23:14	21:30	23:08	22:59	23:05

Fuente: Henesey *et al.* (2006d).

Siguiendo con la aplicación de estos modelos en el caso de transbordo, Henesey *et al.* (2006a) utilizan SIMPORT para evaluar y comparar los resultados de ocho estrategias distintas en relación a *transhipments* de contenedores. En este estudio utilizan una aproximación muy similar en cuanto a definiciones, políticas evaluadas y generación de escenarios llegando a las siguientes conclusiones en el caso experimental analizado:

- Las políticas de asignación de espacios por destinos presentan usualmente mejores resultados que si se agrupan contenedores por compañías.
- Las políticas OTS derivan en menores costes de operación (seguramente por el mayor coste unitario del barco que de los equipos de transporte horizontal y toda vez que esta política trata precisamente de minimizar los tiempos de escala media de los barcos en puerto).
- Cuando además las políticas OTS se combinan con SJB los resultados mejoran en cuanto a un más rápido tiempo medio de estancia se refiere.

Por su lado Kefi *et al.* (2007) utilizan metodologías basadas en agentes para simular y optimizar los espacios necesarios de una terminal de exportación (no consideran contenedores descargados para importación sino únicamente los que llegan al puerto para su salida apuntando para futuros trabajos la extensión a combinaciones import-export). En su programación (basada en la plataforma JADE¹⁷⁹) se fijan como objetivo la minimización de movimientos y remociones de

¹⁷⁹ JADE es el acrónimo de *Java Agent Development Framework* y es una plataforma específica para el desarrollo de modelos ABS en Java.

contenedores y para ello utilizan una arquitectura basada únicamente en dos clases de agentes: el contenedor (“*Container Agent*”) y una interface o agente inteligente (“*Interface Agent*”) en el que se guarda tanto información estática de cada contenedor-agente (código de identificación, puerto de destino, carga transportada, tara y dimensiones) como dinámica (estado y categoría del contenedor-agente tal y como se describe a continuación y número de contenedores-agente encima y debajo de cada contenedor).

Efectivamente, cada contenedor es un agente que se define por:

- 1) sus características estáticas (arriba definidas);
- 2) por su estado, que puede ser satisfecho/insatisfecho (según el mismo tenga que ser movido o no, o dicho de otro modo un contenedor está satisfecho si el mismo ni tiene que exportarse ni bloquea la salida de otro que tenga que exportarse lo que obligaría a su remoción); y,
- 3) por su categoría que se define como libre u ocupado según el mismo tenga contenedores encima (ocupado) o no los tenga (libre).

En un verdadero salto de escala, Bin *et al.* (2009) introdujeron un ABS, en el que utilizan un total de 14 agentes diferentes para modelizar también una terminal de contenedores (complicando mucho el modelo y requiriendo mucho mayor gasto computacional). Es, además, destacable pues los mismos ya utilizan un paquete comercial desarrollado específicamente para la simulación mediante agentes, en concreto AnyLogic 6.2, cuyas referencias son cubiertas en otros apartados introductorios de esta tesis y que también utilizarán en ambiente portuario Mustafee y Bischoff (2011).

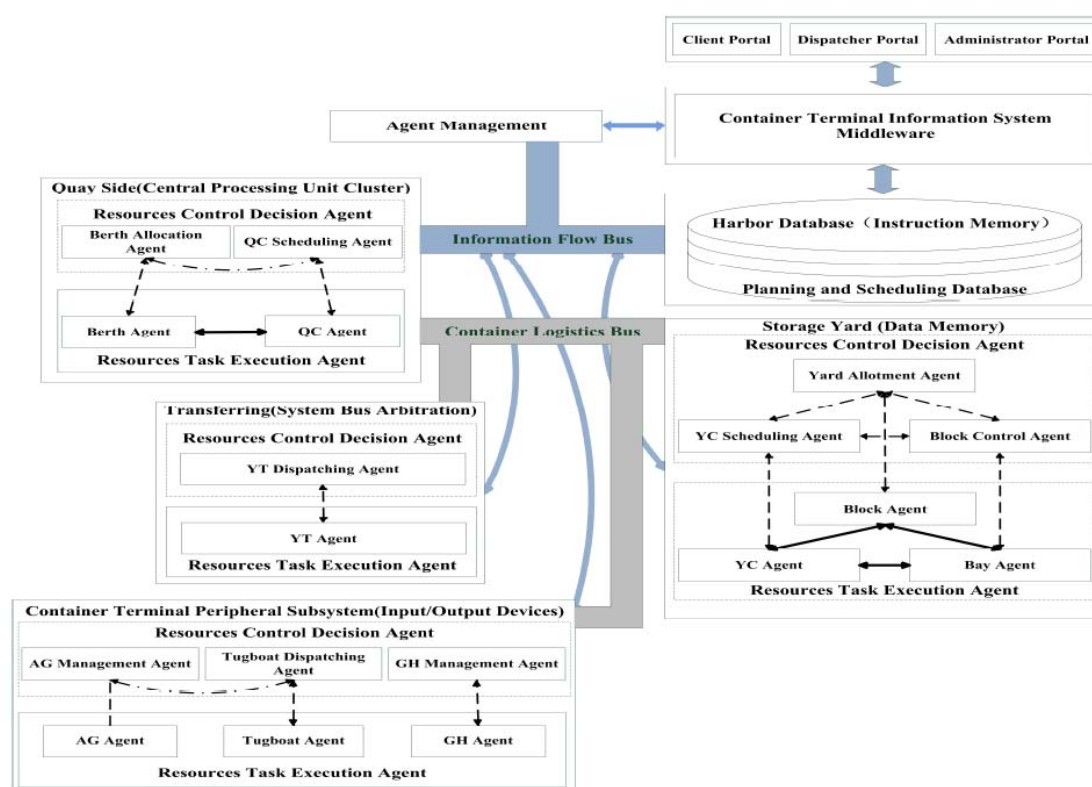
Si bien para los primeros el aspecto nuclear del estudio es simular, resolver y optimizar las políticas de asignación de atraques; los segundos introducen un interesante enfoque en el que otras consideraciones son tenidas en cuenta (por ejemplo estabilidad de las pilas de contenedores, posibilidad de contaminación de mercancías por proximidad con otras, etc...)

Vidal y Huynh (2010) y Huynh y Vidal (2010), apoyándose en el software Netlogo, realizan una modelización mediante sistemas ABS para modelizar las operaciones en el parque de almacenamiento de una terminal de contenedores. Estos autores modelizan el funcionamiento de las grúas de patio que actúan como agentes sobre las que prueban diferentes funciones de optimización, concluyendo que, en el caso experimental por ellos analizado, los mejores resultados se obtienen cuando se asigna el trabajo al medio de transporte más cercano sin necesidad de seguir una política de asignación FIFO.

Li y Li (2010), continuando con los trabajos que habían empezado en Li *et al.* (2008y 2009) presentan un modelo ABS para una terminal de contenedores, esta vez basándose en el diseño conceptual que aporta la llamada arquitectura de Harvard (*computational framework Harvard*

architecture) con la ayuda del software AnyLogic ©. Se trata de un modelo integrado (incluye todos los elementos de la terminal y no se detiene en resolver un problema específico) que contrastan con un experimento concreto ofreciendo los resultados obtenidos de los ejercicios de simulación en diferentes escenarios. El esquema de dicha arquitectura se presenta en la ilustración 51 y proporciona según los propios autores una “*metodología sistemática y aplicable para el cumplimiento simultáneo de las tareas de programación y asignación de recursos así como aquellos procesos de decisión que deben implementarse en una terminal de contenedores*”.

Ilustración 51: Modelización de una terminal de contenedores utilizando la arquitectura de Harward.



Fuente: Li y Li (2010).

Li (2010) y más tarde Cranefield *et al.* (2011) y Winikoff *et al.* (2011) presentan un proyecto de investigación conjunto entre la industria y la universidad que consiste en la aplicación de técnicas ABS para la optimización de una terminal de contenedores. Por el lado de la industria participa *JADE Software Corporation* (Christchurch, Nueva Zelanda), empresa que ha desarrollado una solución de propósito específico para puertos denominada *Jade Master Terminal (JMT)*¹⁸⁰, sistema que esta compañía ha implantado en puertos, operadores logísticos y terminalistas en

¹⁸⁰ Este software puede ser aplicado tanto a terminales de contenedores, como RO-RO, polivalentes (o cargas mixtas) (JADE, 2017a) proporcionando la empresa desarrolladora una descripción técnica detallada en JADE (2017b).

diversas localizaciones, entre otras, Italia¹⁸¹, Emiratos Árabes Unidos¹⁸², México¹⁸³, Qatar¹⁸⁴ o Nueva Zelanda¹⁸⁵ (JADE, 2017c). Por el lado de la comunidad universitaria participan las Universidades de Otago (Dunedin, Nueva Zelanda), Canterbury (Christchurch, Nueva Zelanda) y Duisburg-Essen (Essen, Alemania).

Sobre la plataforma que proporciona el software de JADE, el grupo de trabajo desarrolla un entorno de simulación específico que denominan ContMAS (*Container Multi-Agent System*) cuyos orígenes se remontan a los trabajos de Hanno-Felix Wagner en el año 2009 para obtener el grado de Ciencias Computacionales Aplicadas en el *Institute for Computer Science and Business Information Systems* de la Universidad de Duisburg-Essen (Essen, Alemania) y que después hizo evolucionar en su estancia en las Universidades de Otago y Canterbury en Christchurch (Nueva Zelanda) (Wagner, 2014).

Winikoff *et al.* (2011) indican cómo ciertas características de las terminales de contenedores les hacen firmes candidatos a ser sometidos a técnicas de simulación mediante ABS o MAS¹⁸⁶ pero, al tiempo, señalan como la realidad de una terminal de contenedores es demasiado compleja como para pretender abordar un proyecto de automatización de la terminal bajo estas técnicas siendo necesario acotar el alcance. Así, señalan como la búsqueda de este objetivo de automatización de la terminal era el *leit motiv* de trabajos iniciales como los de Rebollo *et al.* (2000) y Thruston y Hu (2002) al tiempo que indican que estos trabajos adolecen de contar con resultados experimentales contrastables y que fueron desarrollos puntuales y ciertamente discontinuados.

El modelo ContMAS cuya arquitectura se presenta en la ilustración 52 se construye con una serie de agentes que cooperan de una manera asíncrona con el objetivo de realizar la descarga de un barco y optimizar el depósito de los contenedores en el patio (y para lo que se apoyan en algoritmos genéticos). Según sus propios autores es un modelo que puede ser utilizado tanto para chequear la configuración de un puerto de nueva planta como un rediseño de unas instalaciones existentes. Entre las posibilidades que se pueden explorar con ContMAS destacan la comparación de estrategias de operación, simular diversos escenarios de utilización de espacios y medios

¹⁸¹ JMT está implementado en la terminal de Génova (Italia) desde el año 2009 (Port Technology, 2008).

¹⁸² JMT se implementa por ejemplo en la terminal de contenedores New Gulfterminal Terminal (Emiratos Árabes) en el año 2010 (LBR Staff Writer, 2010) y en un conjunto de puertos en Abu Dhabi en 2015 (JADE, 2015).

¹⁸³ JMT ha sido implementado en el puerto de Veracruz (México) (WorldCargo, 2014).

¹⁸⁴ JMT se instala para la gestión del puerto de Doha (Qatar) (Nobx, 2012).

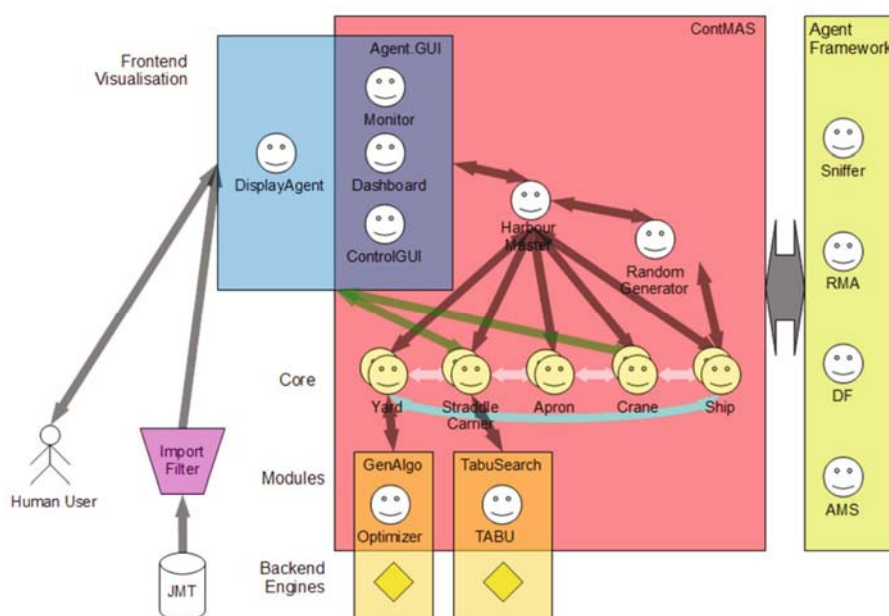
¹⁸⁵ Por citar algún ejemplo JMT se implementa en Port Nelson (Nueva Zelanda) para la gestión de una terminal de carga general (JADE, 2009) ; en South Port (Nueva Zelanda) para la gestión de una terminal de contenedores, (South Port, 2017) y en el Puerto de Otago (Nueva Zelanda) para una terminal multipropósito (WorldCargo, 2007)

¹⁸⁶ Dentro de las características que hacen que los sistemas ABS o MAS se adapten bien a la realidad de una terminal de contenedores indican que por un lado el sistema puede caracterizarse por la interacción entre diferentes entidades que están distribuidos en el sistema y son autónomos (en este caso grúas y medios de manipulación) pero que buscan un objetivo común (carga y descarga de buques) y que el sistema es de naturaleza dinámica y cambia con el tiempo pudiendo evolucionar bien o mal.

portuarios o incluso ayudar a resolver problemas en tiempo real en un puerto en operación configurándose como un DSS o un TOS.

Desde el punto de la estructura lógica cada uno de los agentes es modelado en un dominio independiente, si bien puede moverse de un dominio a otro. Por citar un ejemplo, las “grúas” (uno de los agentes del sistema) residen en el dominio “grúas” pero pueden moverse a otros dominios (por ejemplo en el que residen los *straddle carriers*) para intercambiar contenedores entre sí. Mediante este sistema los autores logran dar una dimensión dinámica al modelo que es capaz de calcular el camino lógico más corto para cumplir el objetivo marcado. Desde el punto de vista de la implementación de la negociación entre agentes los autores usan la plataforma de búsqueda tabú en JAVA conocida como OpenTS (Harder, 2017).

Ilustración 52: Arquitectura del sistema ContMAS.



Fuente: Winikoff *et al.* (2011).

Mustafee y Bischoff (2011) al margen de introducir un interesante “estado del arte” en técnicas basadas en agentes usadas en puertos realizan un modelo con la ayuda del software comercial Jinngine¹⁸⁷ combinado con AnyLogic ©¹⁸⁸.

Estos autores en realidad combinan tanto los sistemas ABS como los que denominan CLA's ("*Container Loading Algorithms*"), siendo seguramente los primeros autores que utilizan técnicas

¹⁸⁷ Mustafee y Bischoff (2011) utilizan Jinngine para modelizar uno de los atributos de los agentes seleccionados como es la estabilidad de la carga.

¹⁸⁸ Mustafee y Bischoff (2011) utilizan AnyLogic© para modelizar el segundo atributo de los agentes que someten a estudio que es la posibilidad de contaminación de una carga por cercanía a otras (“*cross-contamination*”).

ABS para abordar específicamente el problema de carga de contenedores / planes de estiba de un barco.

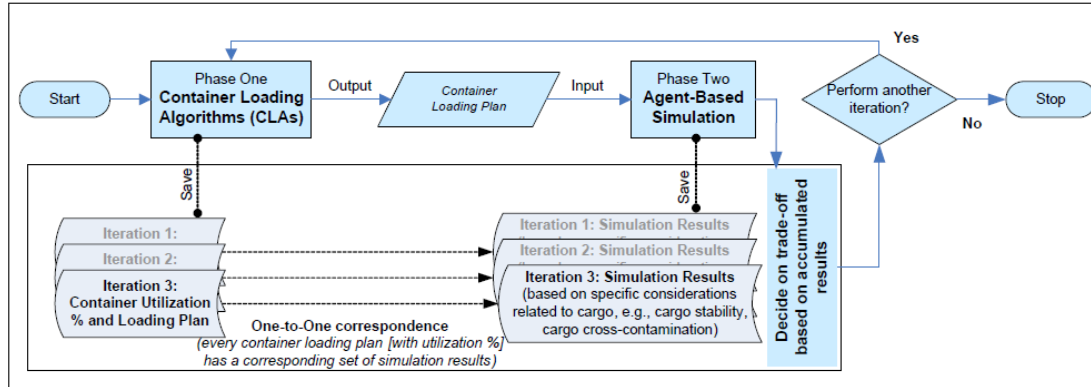
Los CLA's han sido introducidos por George y Robinson (1980) pero bastante extensamente tratados en la literatura por autores posteriores como Gehring y Bortfeldt (1997), Bortfeldt y Gehring (1998), Ratcliff y Bischoff (1998), Davies y Bischoff (1999), Terno *et al.* (2000), Bortfeldt y Gehring (2001), Gehring y Bortfeldt (2002), Pisinger (2002), Eley (2002), Eley (2003), Gehring *et al.* (2003); Bortfeldt *et al.* (2003), Mack *et al.* (2004), Moura y Oliveira (2005), Bischoff (2006), Wäscher *et al.* (2007), Parreño *et al.* (2008), Wang *et al.* (2008), Huang y He (2009), Fanslau y Bortfeldt (2010), Egeblad *et al.* (2010), Bortfeldt y Wäscher (2012), Moura *et al.* (2013), Bortfeldt y Wäscher (2013), Zhao *et al.* (2014); Galvão Ramos *et al.* (2014), y Moura y Bortfeldt (2016).

En la ilustración 53 se puede observar como el modelo se articula en 2 pasos. El punto de unión entre ambas fases es el plan de carga que se genera en la fase 1 por el CLA y que se ejecuta en la fase 2 mediante una simulación ABS. El modelo realiza iteraciones (generando sucesivos planes de carga en fase 1 que se ejecutan en fase 2) y va registrando y salvando determinados atributos que sirven para su posterior análisis y que son los que los autores toman en consideración junto a la eficiencia del proceso.

Efectivamente, en relación a los CLA's, se registran principalmente los ratios de utilización (eficiencia en el proceso de carga) y en relación a los ABS aspectos relacionadas con la estabilidad física del plan de carga y su fragilidad (aspecto para el que se apoyan en el software Jinngine) y la *cross-contamination* (que se modeliza vía Anylogic ©).

En relación a este último aspecto los autores otorgan a cada contenedor un atributo o grado según lo perecedero que sea la mercancía que transportan y definen la posibilidad de que un contenedor "contaminado" pueda contagiar a otro cercano deteriorando su mercancía (por transmisión del moho de un producto perecedero a otro).

Ilustración 53: Diagrama de flujo el sistema combinado CLA's – ABS .



Fuente: Mustafee y Bischoff (2011).

En su artículo los autores presentan una tabla en la que justifican la decisión de haber implementado un ABS para estudiar la estabilidad o la contaminación de la carga. Para los investigadores, estos atributos presentan las características básicas que se exige de los agentes en este paradigma: 1) los agentes proporcionan atributos medibles (en el caso de estabilidad las dimensiones y peso de contenedor o en el caso de la *cross-contaminación* el estado de frescura de un producto y el tiempo necesario para desarrollar la contaminación, por ejemplo, moho); 2) comportamiento autónomo (en efecto la estabilidad de un contenedor depende de sus dimensiones, peso, etc... y la posibilidad de contaminación de una mercancía depende de su propio grado de frescura que se va perdiendo en el tiempo); y, 3) en que la interacción entre agentes puede desembocar en un comportamiento aún más complejo del conjunto (efectivamente la estabilidad individual de un contenedor se ve comprometida por la de los contenedores que están a su alrededor, encima o abajo o las mercancías más perecederas pueden deteriorarse más rápidamente cuando entran en contacto con otras mercancías ya contaminadas).

Huynh y Vidal (2012) con un modelo ABS tratan las grúas del patio de una terminal de contenedores como agentes autónomos que buscan maximizar su utilidad, focalizando por tanto sus esfuerzos en resolver mediante paradigma ABS el YCSP (*“Yard Crane Scheduling Problem”*), siendo los primeros autores que resuelven este problema bajo esta disciplina (anteriormente había sido resuelta con las clásicas técnicas DES).

Para ello desarrollan un elemento clave en el modelo como son los atributos básicos de decisión que en este tipo de terminal tiene el operador de la grúa del patio para seleccionar que camión o tractor va a servir. El modelo proporciona interesantes resultados sobre estrategias de servicio combinadas, ofreciendo conclusiones tanto en las distancias a recorrer por los medios como en el tiempo en dar el servicio requerido; demostrando como acoplando conjuntamente las dos (no decantándose por una u otra de manera determinista) se consiguen mejores resultados. La herramienta desarrollada permite, además, su implantación en tiempo real actuando como un DSS

ayudando a que los operadores de la terminal tomen las decisiones más acertadas en cada momento para mejorar la productividad de dichas grúas.

Los autores programan su modelo con la ayuda del software comercial NetLogo© aplicando a un experimento práctico en el puerto de Charleston (Carolina del Sur, Estados Unidos).

Este mismo alcance es el que adoptan Sharif *et al.* (2012) quienes también tratan de resolver el YCSP en una terminal de contenedores.

Najib *et al.* (2012) utilizan un sistema multiparadigma para modelizar un sistema de gestión integral de una terminal de contenedores (o siguiendo su terminología un CTMS de “*Container Terminal Management System*”). Estos autores construyen una arquitectura basada en tres ejes de actuación siendo la novedad que más allá de construir exclusivamente un clásico módulo en que se describen y modelizan los actores de la terminal y sus relaciones, en uno de los ejes de actuación se hace especial hincapié en modelizar los aspectos de seguridad de la terminal centrándose en la gestión de mercancías peligrosas.

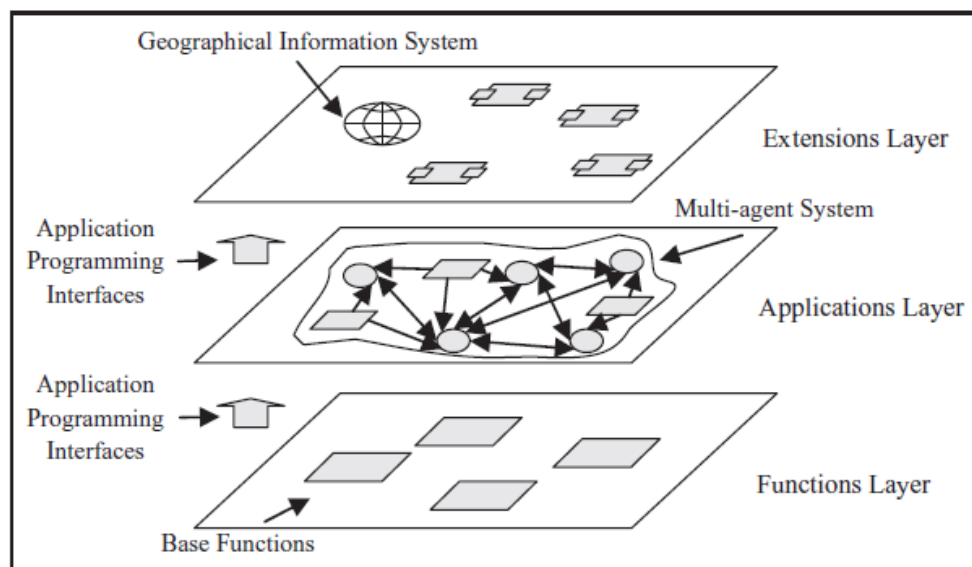
Un trabajo muy interesante en este aspecto es el de Sun *et al.* (2013) del Centro de Estudios Marítimos de la Universidad de Singapur en su aplicación práctica para diseñar la expansión de grandes puertos de contenedores en dicho país. Estos autores fusionan las tecnologías GIS con las MAS a través de la herramienta Microcity ®¹⁸⁹ abriendo un interesante campo para el futuro.

Esta herramienta (Microcity ®), está especialmente diseñada para realizar análisis espaciales en entornos de simulación. De este modo en un sistema de tres capas (ver ilustración 54) denominadas “*extension layer*” (primera capa donde se define físicamente las instalaciones utilizando tecnologías GIS), “*application layer*” (donde opera el MAS) y “*functions layer*” (donde se ubican las funciones de base y se programa el modelo MAS propiamente dicho que se codifica en el lenguaje de programación Lua¹⁹⁰). Las tres capas se complementan con un conjunto de interfaces entre cada una de ellas donde un usuario es capaz con nada más que cambiar la configuración geográfica en la primer de las capas (GIS) simular diferentes escenarios sin necesidad de conocer los detalles de las otras dos.

¹⁸⁹ Microcity© es una herramienta GIS de modelización espacial concebida como soporte de análisis científicos desarrollada conjuntamente por DMS (Dalian Maritime University, China) el laboratorio Hayashi & Kato (Universidad de Nagoya, Japón) y el CMS (Centre for Maritime Studies, Universidad Nacional de Singapur) (Microcity, 2017) que cuenta con una extensión especialmente diseñada para su implementación en entornos portuarios (Microport, 2017).

¹⁹⁰ Véase Lua (2017).

Ilustración 54. Estructura en tres capas para integrar GIS y MAS utilizando MicroCity©.

Fuente: Sun *et al.* (2013)

En la ilustración 55 se muestra la arquitectura del sistema, donde estos autores definen ocho procesos que se desarrollan en la terminal: 1) asignación de muelle (“BAP”); 2) asignación de grúa de muelle (“QCAP”); 3) programación de grúa de muelle (“QCSP”); 4) asignación de espacio en patio; 5) utilización de grúas de patio (denominado en la ilustración 55 “*YC deployment*” y equivalente al “YCAP”); 6) despacho de grúas de patio (denominado en la misma ilustración como “*YC dispatching*” equivalente al “YCSP”); 7) despacho de medios de transporte horizontal; y, 8) trayectoria (“*routing*”) de los medios de transporte horizontal.

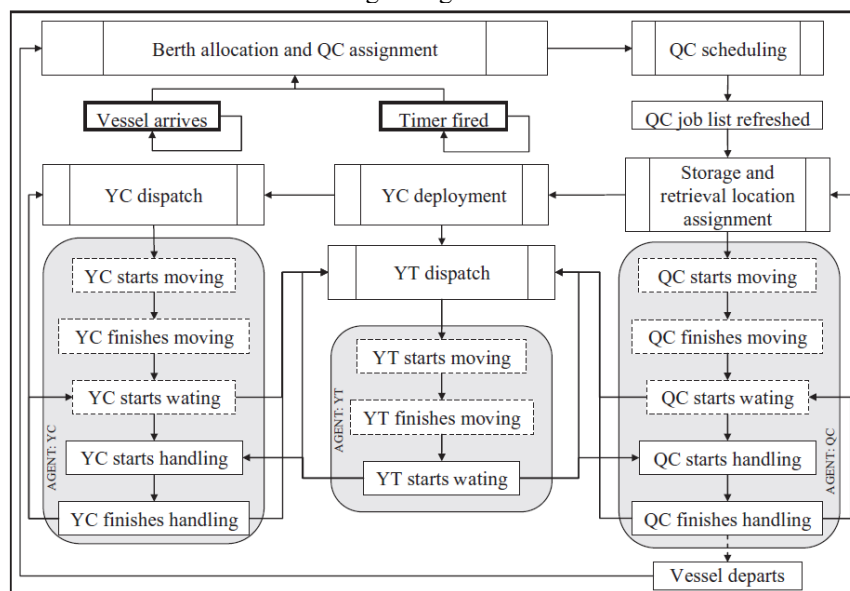
Una vez que el usuario define el diseño (GIS) y realiza la asignación de recursos (algo que el sistema también puede realizar automáticamente aplicando reglas de proporcionalidad) se transfieren los resultados al MAS que pasa a realizar la simulación y registrar los resultados.

Para ello los autores definen las siguientes relaciones entre agentes: 1) interferencia entre grúas de muelle; 2) interferencia entre grúas de patio; 3) interferencia entre medios de transporte horizontal; 4) interferencia entre grúas de muelle y medios de transporte horizontal; y, 5) interferencia entre grúas de patio y medios de transporte horizontal.

Así, al comenzar la simulación el modelo empieza a generar llegadas de barcos, que a su vez lanzan los procesos de decisión antes mencionados (BAP, QCAP, YCAP, etc...) y generan las oportunas órdenes de trabajo en función de: 1) la interacción entre los diferentes agentes (los agentes se comunican y toman sus decisiones en función de su conocimiento y la información que reciben de los otros agentes); y, 2) las reglas de actuación que se han definido en la capa de

funciones (por ejemplo criterios de asignación FIFO, políticas de asignación de medios por tiempos más cortos o por menor desplazamiento, etc...).

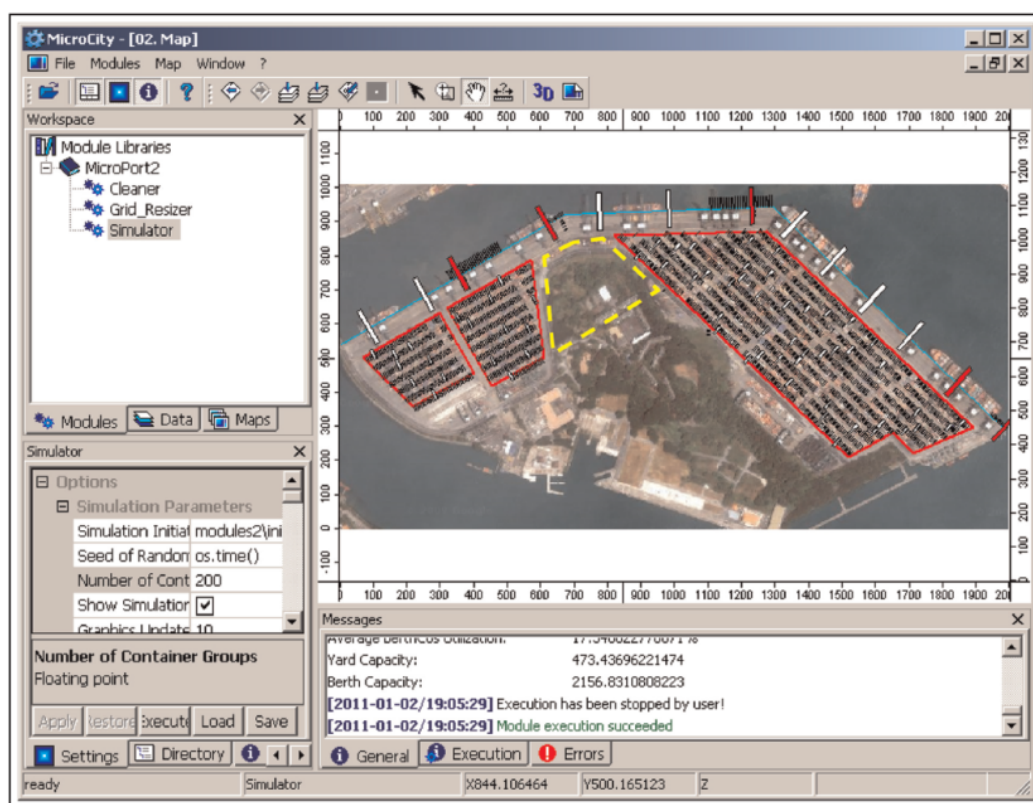
Ilustración 55. Diagrama general de simulación.



Fuente: Sun *et al.* (2013).

Utilizan el modelo para analizar las posibles expansiones de terminales de contenedores de gran tamaño de Singapur y para ello calibran el modelo con la terminal de Brani (Singapur). En la ilustración 56 se muestra un ejemplo de la integración del GIS y la simulación para este caso específico extraído del propio artículo.

Ilustración 56. Ejemplo de integración GIS – Simulación con la herramienta MicroCity©.



Fuente: Sun *et al.* (2013).

También con técnicas ABS, Fleming *et al.* (2013) tratan de modelizar y evaluar el rendimiento de una cola de camiones en los accesos de una terminal de contenedores bajo un enfoque de una única cola y considerando las restricciones que se imponen en el movimiento de los elementos que pasan a formar parte de la cola¹⁹¹.

Estos autores comparan dos estrategias de operación en distintas condiciones de trabajo. Las estrategias sometidas a análisis son las que denominan “*pooled queue*” y “*nonpooled queue*” concluyendo que en el caso experimental por ellos estudiado la primera de las estrategias es más efectiva (produce menores tiempos de espera en las colas y menores variabilidades de los tiempos en cola ante diferentes condiciones).

Fang *et al.* (2014) centran sus estudios en ver como la introducción del tráfico de GNL en un puerto afecta al tráfico marítimo del mismo (estudian estos autores un caso práctico en el área

¹⁹¹ Estos autores indican que los movimientos internos en otros sistemas de colas (por ejemplo cuando se trata de analizar las colas en relación a seres humanos), el movimiento de los elementos dentro de la cola no tiene importancia y su efecto puede ser ignorado; sin embargo, en una cola de camiones el peso, las dimensiones y movilidad de los medios tiene que ser tenida en cuenta necesariamente.

central del puerto de Ningbo-Zhoushan en el noroeste de China¹⁹²). Mediante un modelo ABS calculan los efectos negativos en los tiempos de espera que introduce este nuevo tráfico y evalúan la efectividad de determinadas medidas paliativas.

Garro *et al.* (2015) describen su modelo como una combinación de programación matemática (“*mathematical programming*”) con técnicas ABS con el objetivo de optimizar la utilización de los *straddle carriers* en una terminal. Su diseño experimental se basa en una terminal de transbordo de contenedores y tratan de optimizar el *pool* de *straddle carriers* que dan servicio a las grúas de muelle en las operaciones de carga y descarga de la terminal.

Mes y Douma (2016) estudian el caso de una terminal de contenedores atendida por barcazas que llegan de una manera dinámica y aleatoria (sin conocimiento prefijado sobre el programa de llegadas) aplicando su modelo al caso experimental de una terminal real en el Puerto de Rotterdam (Holanda). Este problema había sido estudiado también bajo enfoque MAS por Schut *et al.* (2004)¹⁹³ y Moonen *et al.* (2005) y bajo una metodología más simple por Konings (2007)¹⁹⁴.

Estos trabajos previos son después recopilados por el propio A.M. Douma en su tesis doctoral (Douma, 2008), teniendo como precedente los trabajos preliminares de Douma *et al.* (2007) y como posteriores aportaciones científicas las subsiguientes publicaciones recogidas en Douma *et al.* (2009, 2011 y 2012) y Mes *et al.* (2014). Todos ellos pueden ser considerados como integrantes de una misma serie científica cuyas bases se describe a continuación.

El problema, que resuelven mediante técnicas MAS, es esencialmente un BAP llegando a conclusiones sobre como incrementar el grado de utilización del muelle aplicando diferentes flexibilidades en la planificación operacional. Para ello exploran como alternativa una estrategia de integración basada en una planificación distribuida (en vez de la histórica estrategia centralizada) llegando a conclusiones positivas en cuanto al tiempo de servicio.

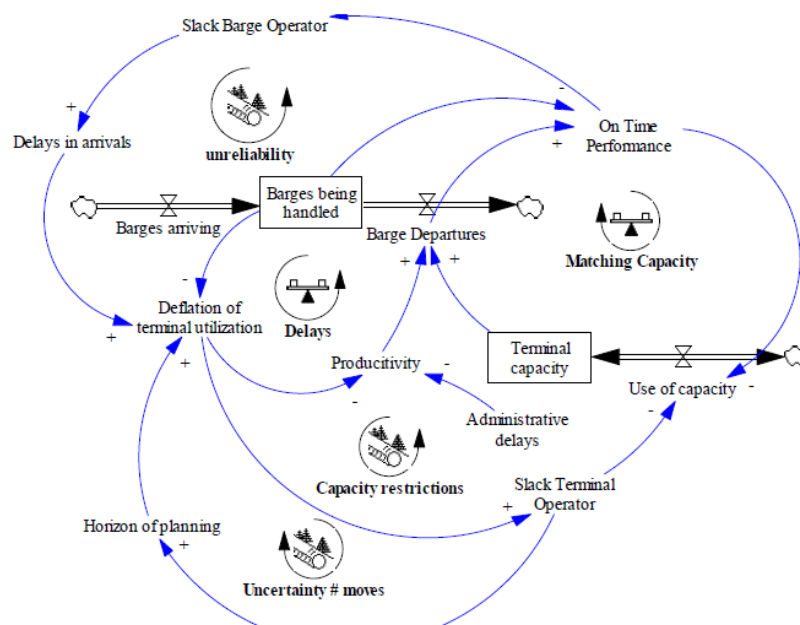
En sus estudios abordan como reorganizar la gestión de un tráfico de barcazas con origen el puerto de Rotterdam y con destino distintas terminales fluviales situadas a lo largo del río Rin. Su propuesta consiste en modelizar el sistema dividiéndolo en una línea troncal a lo largo del hinterland (terminales fluviales) y unas operaciones de recogida/distribución en el puerto de Rotterdam (terminales marítimas), sintetizando el modelo en el diagrama causal representado en la ilustración 57.

¹⁹² Cuarto puerto del mundo por volumen de contenedores movido en 2015, con unos movimientos totales de 20.6 millones de TEU's (19.5 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

¹⁹³ Estos autores desarrollan un modelo que llaman “*APPROACH*” y que aplican a la misma terminal de contenedores en el puerto de Rotterdam (Holanda) y que también se presenta en Moonen *et al.* (2007).

¹⁹⁴ Estos autores, hasta lo que ha podido averiguarse no utilizan una modelización en sí misma sino una metodología de análisis del coste marginal descrita en Dekker y de Jong (1989).

Ilustración 57. Estructura causal del modelo MAS para resolver el problema de programación de atraques en una terminal atendida por barcasas en el puerto de Rotterdam (Holanda).



Fuente: Schut *et al.* (2004).

La línea de trabajo descrita en los estudios anteriores es continuada por Li *et al.* (2014 y 2016) pero abandonando el caso experimental del puerto de Rotterdam para abordar mediante un sistema multi-agente la planificación del transporte intermodal de varios operadores que tratan de colaborar para atender un nivel de demanda determinada y obtener unos mejores resultados en términos de coste. Estos autores se basan en una metodología DMPC (*distributed model predictive control methodology*) en la que la demanda conjunta se optimiza mediante un procedimiento iterativo en el que los operadores (agentes en el modelo) intercambian información sobre su planificación y toman decisiones conjuntas (intercambio físico de posiciones) para mejorar el resultado global.

3.3.3 Enfoque integrado y de resolución aislada de problemas utilizando técnicas ABS.

Como se ha analizado y entroncando con otros puntos de esta tesis doctoral, se puede observar como mientras unos autores tratan con técnicas ABS o MAS de resolver diferentes problemas de manera global o integrada (2 o más problemas), otros se centran en la resolución de un único problema usando estas mismas técnicas.

Esto da idea de la flexibilidad y amplio campo de aplicación de estos modelos y como estos sistemas pueden complementar a los más clásicos desarrollos DES basados en eventos discretos.

Entre los autores más significativos que utilizan un enfoque integrado figuran en primer lugar Gambardella *et al.* (1998) que tratan la asignación y programación de medios de una terminal de una manera global modelizando todos sus componentes; Hensey (2006a) quien con su modelo *SIMPORT* trata de comparar una combinación de estrategias diferentes (estrategias de asignación de atraque, políticas de prioridad de atraque y políticas de almacenamiento) bajo un enfoque asimismo integrado; Yu y Wang (2006) quienes analizan conjuntamente tanto el BAP como la asignación de medios (grúas y medios terrestres para el despacho de un barco). Siguiendo en orden cronológico integrado es también el modelo de Li y Li (2010) o, más recientemente, el de Sun *et al.* (2013) en su interesante desarrollo de una aplicación que combina GIS con la gestión completa de la terminal (analizando los 8 procesos que ya se han descrito).

Otros autores centran sus estudios en problemas más aislados. Bin *et al.* (2008) se focalizan en la mejora de las políticas de asignación y despacho de elementos de transporte horizontal; Mustafee y Bischoff (2011) en la optimización de los planes de estiba del barco; Kefi *et al.* (2007) en las estrategias de almacenamiento con especial atención a la minimización de remociones (“YAP”); Sharif *et al.* (2012) y Huynh y Vidal (2012) en la programación de operaciones de grúas de patio (“YCSP”); Henesey *et al.* (2004), Bin *et al.* (2009), Huynh y Vidal (2010) o Vidal y Huynh (2010), en las puras política de asignación de atraque (“BAP”); Henesey *et al.* (2008 y 2009a) y Awais y Milants (2009), en la evaluación y optimización de AGV’s; Thurston y Hu (2002) en el problema de programación de operaciones de grúas de muelles (“QCSP”) alimentados por una flota de AGV’s; Henesey y Törnquist (2002) en la simulación de la interface puerto-ferrocarril y por tanto en la coordinación del puerto con las redes exteriores de transporte; Fang *et al.* (2014) en el estudio del tráfico marítimo en un determinado puerto y Garro *et al.* (2015) en la programación y asignación de *straddle carriers* en los procesos de transporte horizontal.

Quizá en este punto debería recordarse lo que se indicaba citando a Winikoff *et al.* (2011). Este autor señalaba como ciertas características de las terminales de contenedores le configuran como un sector idóneo para aplicar técnicas ABS o MAS pero, al tiempo, como la realidad de una terminal de este tipo es muy compleja como para pretender abordar un proyecto de automatización de la misma bajo estas técnicas siendo necesario acotar el alcance. Esto parece apuntar a su preferencia en cuanto a la formulación de modelos aislados (o que resuelvan un número limitado de problemas) más que un modelo global o totalmente integrado, siendo esta preferencia la que parece confirmar la propia evolución bibliográfica que se ha repasado en los dos últimos párrafos, donde los primeros modelos bajo este paradigma son globales o integrados y poco a poco van dejando paso a modelos de tipo aislado.

3.3.4 Software para la realización de simulaciones ABS en entorno portuario.

Macal (2016) señala que los sistemas ABS tienen una historia de más de 40 años, si bien en los últimos 20 han tenido un desarrollo más relevante ayudado por el lanzamiento del primer software de propósito general especialmente diseñado para realizar modelizaciones bajo este paradigma; que no es otro que el modelo *Swarm Simulation System*¹⁹⁵ (conocido habitualmente simplemente como *Swarm*) desarrollado por Chris Langton y otros colegas del Santa Fe Institute (Nuevo Méjico, Estados Unidos)¹⁹⁶ (Minar *et al.*, 1996).

Según Allan (2010) este software vio la luz en 1994 y hoy es el más maduro de su clase, siendo creado originariamente sobre Objective-C y más tarde con posibilidad de desarrollo en Java. Para este autor “*Swarm es aún probablemente la plataforma de simulación más poderosa y flexible...*”¹⁹⁷ pero “*con una escarpada curva de aprendizaje,...siendo necesario contar con experiencia en Objective-C y posiblemente en Java, para llegar a dominar la metodología y ser capaz de aprender los códigos de Swarm*”. Desde 1999 este software es controlado y mantenido por un grupo sin ánimo de lucro conocido como *Swarm Development Group* (Wikipedia – Swarm Development Group, 2017).

A este lanzamiento siguieron otros lenguajes de simulación y simuladores ABS de código abierto entre los que podrían citarse como los más relevantes: NetLogo¹⁹⁸ (Wilensky 1999, Wilensky y

¹⁹⁵ Este primer paquete de simulación bajo ABS es según Wikipedia – Swarm (2017) un recurso abierto (no sometido a licencia) que permite simular la interacción entre agentes (sociales y biológicos) y es útil para conocer su comportamiento colectivo. Este paquete fue lanzado a mediados de la década de los 90 (según Minar *et al.*, 1996 existía una versión *Beta* en 1996 mientras que Wikipedia – Swarm, 2017 fija su lanzamiento oficial en noviembre de 1997 y Allan (2010) habla de unos primeros trabajos en 1994). Es un sistema que puede operar tanto en sistemas operativos Windows como UNIX y sus códigos fueron escritos originalmente en Java y Objective-C.

¹⁹⁶ Otros participantes en el proyecto junto con Chris Langton fueron: Roger Burkhart, Nelson Minar, Manor Askenazi, Glen Ropella, Marcus Danielsy Alex Lancaster.

¹⁹⁷ Por el contexto (se trata de un trabajo donde se discute únicamente el software ABS) se entiende que al calificar *Swarm* de esta manera se refiere a aplicaciones de simulación ABS y no a todo el universo de software de simulación.

¹⁹⁸ NetLogo es un ambiente de simulación ABS de libre acceso que U. Wilensky desarrolló desde una versión modificada del lenguaje de programación Logo (Wilensky, 1999). Fue en sus orígenes un software diseñado para servir de laboratorio donde enseñar conceptos complejos (North *et al.* 2005) y hoy es un software que ha presentado un notable desarrollo en muchos campos científicos (educación, ciencias de la salud,...) y, hasta lo que se ha podido conocer, una relativa penetración en el mundo de los transportes y concretamente en la gestión portuaria. Se han encontrado muy pocas referencias en el completo listado de referencias que se incluye en Netlogo (2017) siendo la más destacable la de Jerry *et al.* (2015) centrada en construir un modelo para gestión del tráfico, pero fuera de este listado, se han localizado tres referencias específicas en el campo de puertos y terminales marítimas como son las citadas de Vidal y Huynh (2010), Huynh y Vidal (2010 y 2012).

Rand, 2015; NetLogo, 2016), Repast^{199, 200} (Collier *et al.* 2003; North *et al.* 2006 y 2013; Repast, 2016), StarLogo²⁰¹ (Resnick, 1996), Ascape²⁰² (Parker 1999, 2000 y 2001), EcoLab²⁰³ (Standish, 1998, 2000, 2008 y Standish y Leow, 2003) y MASON²⁰⁴ (Luke *et al.* 2003; Luke *et al.* 2004 y Luke *et al.* 2005 y MASON, 2016); así como otro software sometido a licencia como AnyLogic © (Borshchev, 2013; AnyLogic, 2016) o evoluciones hacia capacidades ABS de otros con origen en paradigma DES como sería el caso de Simio © (Simio, 2017) del que como ya se indicó tiene incluso una librería específica para entornos portuarios (Simio, 2016).

Allan (2010) presenta una completa revisión de otro gran número de aplicaciones, desarrollos y librerías bajo sistemas ABS que completan el anterior listado y que aquí se recoge en la tabla 14.

¹⁹⁹ Conforme explican North *et al.* (2006), Repast-3 (*REcursive Porous Agent Simulation Toolkit*) es una familia de tres librerías de acceso libre para su utilización en Java (*Java-based Repast J*); C (*C#-based Repast .NET*) y una versión de Python conocida como NQP ("*Not Quite Python-based Repast Py*") formuladas para su utilización en ejercicios de simulación ABS. Estas librerías fueron creadas por Sallach, Collier, North, Howe, Vos, y otros desde la Universidad de Chicago (Estados Unidos) en colaboración con el Argonne National Laboratory (Illinois, Estados Unidos). Según sus propios autores en sus principios se centró en la modelización del comportamiento social (aunque no limitándose sus capacidades a este campo). Una extensa colección de artículos, tesis y presentaciones en congresos en relación a esta librería puede encontrarse en Repsat (2017a) donde no se ha podido encontrar ninguna referencia en el ámbito de puertos y terminales marítimas.

²⁰⁰ Actualmente Repsat cuenta con dos variantes Repast Symphony 2.4.0 (lanzado el 30 de Septiembre de 2016), librerías para su desarrollo sobre modelos basados en Java y diseñado para su trabajo en workstations y pequeños ordenadores y Repast for High Performance Computing 2.2.0, (lanzado el 30 de Septiembre de 2016), y pensado para funcionar sobre modelos desarrollados en C++ y su utilización en supercomputadores (Repsat, 2017b).

²⁰¹ Startlogo es también un lenguaje de simulación desarrollado sobre Logo. Allan (2010) indica como una de sus ventajas que es un lenguaje de fácil utilización que cuenta con un interface gráfico que permite la creación del modelo de una manera muy sencilla pero como inconveniente que se trata de una aplicación muy poco flexible y que puede ser muy restrictivo si se intenta modelizar mecanismos sociales [interacción entre agentes] muy complejos; lo que en principio parecería descartar su utilización en el campo de terminales marítimas y puertos donde el número de agentes y sus interrelaciones son relativamente complejas.

²⁰² Según se observa en Ascape (2010), Ascape fue desarrollado por Miles Parker (*Brookings Institute Center on Social and Economics Dynamics*, Washington DC, Estados Unidos). Allan (2010), al describir esta herramienta, indica que es una evolución de Swarm aunque resulta un modelo de más fácil utilización pues sus creadores fijaron como objetivo que pudiera ser utilizado por un público con muy pocos conocimientos de programación para desarrollar modelos complejos. Sin embargo para este mismo autor son necesarios unos mínimos conocimientos de la filosofía de programación orientada a objetos y de Java (plataforma sobre la que está escrito Ascape). Cuenta con herramientas para proporcionar estadísticas de simulación, generar gráficos, etc.... De cara a su utilización no se ha documentado su utilización en puertos y terminales siendo su campo de actividad preferencial la economía y modelización de mercados y, en menor medida, la biología y antropología (Allan, 2010) siendo un modelo que parece discontinuado (su última versión Ascape 5.6.0 está documentada el 8 de agosto de 2010 conforme la información de Ascape (2010).

²⁰³ Conforme se desprende de Allan (2010); EcoLab es un ambiente de simulación escrito y mantenido por Russell Standish de la Universidad de Sidney (Australia) y es una evolución de Swarm pero escrito íntegramente en C++ en vez de en Objective-C existiendo aplicaciones que permiten conversiones entre uno y otro lenguaje de simulación. Originalmente fue creado para resolver problemas abstractos en el campo de la ecología pero se ha implementado en otros campos denotando una naturaleza de propósito general.

²⁰⁴ MASON (acrónimo de *Multi-Agent Simulation of Neighbourhoods*) fue diseñada como una librería de Java y concebida por sus autores como una alternativa de Swarm, Ascape o Repast para la modelización de sistemas con muchos agentes y muchas interacciones incidiendo sus desarrolladores en la rapidez de ejecución y flexibilidad (Luke *et al.*, 2004). El desarrollo es fruto de la colaboración del Departamento de Ciencias Computacionales de la Universidad George Mason (Virginia, Estados Unidos) y el *Center for Social Complexity* de la misma Universidad siendo sus autores Sean Luke, Gabriel Catalin Balan, Keith Sullivan, y Liviu Panait, con la ayuda de Claudio Cioffi-Revilla, Sean Paus, Keith Sullivan, Daniel Kuebrich, Joey Harrison, y Ankur Desai (Luke *et al.*, 2003). Se trata de un recurso de libre acceso descargable desde la referencia MASON (2016), donde además se puede encontrar una colección de artículos y aplicaciones prácticas de utilización de este sistema que se centran en el campo de las ciencias sociales y sólo marginalmente en el de transportes (proyecto de modelización de un sistema urbano de semáforos desarrollado con MASON por G.Balan y S.Luke).

Tabla 14. Paquetes de simulación ABS y sistemas multiagente.

Paquetes Simulación ABS	Sistemas Multiagentes
<ul style="list-style-type: none"> ○ AgentSheets. ○ AndroMeta. ○ AnyLogic ©. ○ Ascape. ○ Breve. ○ Cormas. ○ DEVS: <i>Discrete Event System Specification</i>. ○ EcoLab. ○ FLAME: <i>FLexible Agent Modelling Environment</i>. ○ JAS: <i>Java Agent Based Simulation Library</i>. ○ LSD: <i>Laboratory for Simulation Development</i>. ○ MAML: <i>Multi-Agent Modelling Language</i>. ○ MATSim. ○ MASON: <i>Multi-Agent Simulation of Neighbourhoods</i>. ○ MASS: <i>Multi-Agent Simulation Suite</i>. ○ MetaABM. ○ MIMOSE. ○ MobiDyc: <i>Modélisation Basée sur les Individus pour la Dynamique des Communautés</i>. ○ Modelling4all. ○ NetLogo. ○ Open StarLogo. ○ RePast: <i>Recursive Porous Agent Simulation Toolkit</i>. ○ Repast Symphony. ○ SimPack. ○ SimPy. ○ SOARS: <i>Spot Oriented Agent Role Simulator</i>. ○ StarLogo. ○ SugarScape. ○ Swarm. ○ VisualBots. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ A-globe. ○ ABLE: <i>Agent Building and Learning Environment</i>. ○ Cougaar: <i>Cognitive Agent Architecture</i>. ○ FIPA: <i>Foundation for Physical Intelligent Agents</i>. ○ JADE: <i>Java Agent Development Framework</i>. ○ Jason. ○ MadKit. ○ MAGSY. ○ MASIF. ○ SDML: <i>Strictly Declarative Modelling Language</i>. ○ SeSAm: <i>Shell for Simulated Agent Systems</i>. ○ SimAgent. ○ Zeus.

Paquetes Simulación ABS	Sistemas Multiagentes
o Xholon.	

Fuente: Allan (2010).

En lo que se refiere a la utilización práctica del software de libre acceso o comercial sometido a licencia arriba mencionado en ámbito portuario se puede comprobar que muy pocos son los autores que ofrecen detalles sobre el mismo pudiendo destacar que, en general, está más extendido la utilización de Anylogic © donde podrían citarse autores como Li *et al.* (2008), Bin *et al.* (2009), Li *et al.* (2009), Li y Li (2010), Mustafee y Bischoff (2011) y Netlogo donde se han localizado los trabajos de Vidal y Huynh (2010), Huynh y Vidal (2010 y 2012) quienes utilizan estas librerías de simulación ABS.

Por su parte L.Heneseý en todos los artículos de su serie (solo o junto con otros colegas) que se han descrito con anterioridad en el apartado 3.3.2, utiliza un modelo desarrollado por el mismo que inicialmente toma el nombre de BAMS (*Berth Allocation Management System*) y que después rebautiza con SIMPORT. Este modelo usa *MS Visual Studio 6.0* y se programa sobre C++ para Windows.

Schut *et al.* (2004) también desarrollan su propio modelo MAS que denominaran APPROACH y que es posteriormente utilizado en las investigaciones de Douma *et al.* (2007, 2009, 2011, 2012), Douma (2008) y Mes *et al.* (2014, 20016).

Otros autores utilizan librerías o extensiones ABS específicas. Los ya mencionados Kefi *et al.* (2007) utilizan JADE una plataforma específicamente desarrollada para implementar simulación con el lenguaje Java (JADE es el acrónimo de “*Java Agent Development Framework*”); mientras que Sun *et al.* (2013) utilizan el lenguaje de programación Lua.

Sobre esta misma plataforma de JADE, Li (2010) y más tarde Cranefield *et al.* (2011) y Winikoff *et al.* (2011) trabajan en un modelo que bautizarán como ContMAS (*Container Multi-Agent System*) y que aprovecha los trabajos que *JADE Software Corporation* había hecho en el desarrollo de su software de gestión de terminales JTM (*Jade Master Terminal*) y que se han descrito en puntos anteriores.

3.4 Simulación mediante técnicas basadas en sistemas dinámicos o SD.

3.4.1 Aspectos generales de SD en puertos y clasificación general atendiendo al objetivo del estudio.

Tal y como ponen de manifiesto Caballini *et al.* (2012), los puertos presentan alguna de las características que les hacen susceptibles de ser modelados bajo la disciplina de Sistemas Dinámicos enunciada y desarrollada por J.W. Forrester en el MIT presentado sus primeros trabajos en Forrester (1961) y sucesivas evoluciones en Forrester (1975) y más tarde en Forrester (1996).

Según Caballini *et al.* (2012), estas características serían: complejidad del sistema (caracterizada típicamente por relaciones que obedecen a ecuaciones no lineales entre sus componentes); posibilidad de modelar la realidad mediante ciclos de causalidad o bucles de retroalimentación (referenciados en la literatura científica como “*feedback loops*” o “*casuals loops*”) y posibilidad de aplicar en el sistema el “*principio de acumulación*”.

Este principio de acumulación se produce cuando los flujos o movimientos que se producen en un sistema acumulan “*stocks*” y pueden generarse retrasos temporales (“*temporal delays*”) modelando colas en el sistema. Este principio se representa gráficamente en la literatura científica con los denominados diagramas de flujos y stocks (“*diagrams of flows and stocks*”) de los que más adelante se verá algún ejemplo.

Una vez que se ha llegado a este punto en el presente trabajo no es necesario explicar cómo las características arriba anunciadas son sin duda asimilables al comportamiento de sistemas portuarios.

Sin embargo, aunque las técnicas SD datan de la década de los 60 y se vienen aplicando regularmente en otros campos, salvo en muy contadas ocasiones que a continuación se señalarán, no empiezan a usarse en el contexto marítimo - portuario hasta bien entrada la década de los 2000.

Uno de los grupos de investigación más activos en este campo ha sido el que se referenciará en esta tesis como “*escuela croata*” compuesta por los profesores Ante Munitic, Josko Dvornik, Slavko Simundic, Mirko Bilic y más recientemente Cedomir Dundovic; del grupo de estudios marítimos de la Universidad de Split - Rijeka (Croacia); quienes centran su área

de interés científico en la modelización mediante SD de las operaciones portuarias propiamente dichas.

Dentro de sus trabajos más destacados incluiríamos: Munitic *et al.* (1990), Munitic y Šimundić (2000), Munitic *et al.* (2002, 2003a, 2003b, 2003c, 2003d, 2003e y 2003f), Dvornik *et al.* (2006), Munitic *et al.* (2007) y Dundovic *et al.* (2009).

Tras los autores de esta escuela, a finales de la primera década del año 2000 y comienzo de la segunda surgen una serie de investigadores que trabajan los SD en ambientes portuarios tratando de determinar el impacto económico y/o ambiental de los puertos en la región en que se asientan.

Entre los autores de esta corriente destacan Han (2006), Cui (2007), Yang (2007), Cao (2009), Zhao (2009), Liu *et al.* (2010), Zhang (2010), Wang (2010), Xiaodong *et al.* (2010), Fu (2011a) y Fu (2011b), Dai (2012), Xing (2012), Gao (2012), Yang (2012) Li y Wang (2012), Wang *et al.* (2013a) y Yu *et al.* (2014).

Estos autores (que en contraposición se citarían como “*escuela asiática*”) se ven alertados por el super-desarrollo de los puertos (especialmente los de China) que ha llevado según alguno de ellos a una exagerada competencia inter-portuaria.

Con el apoyo científico que les otorgan los SD ponen de manifiesto cómo en algunos casos se ha alcanzado una situación manifiesta de sobreoferta portuaria que ha empujado incluso a un injustificado descenso de tarifas en aras de la captación de tráfico.

En otros casos, al margen de consideraciones puramente económicas, se han introducido impactos ambientales no suficientemente evaluados.

Mediante estas técnicas de simulación, estos autores logran con éxito introducir la componente ambiental en la toma de decisiones y propiciar un debate sobre políticas de cooperación inter-portuaria.

Por lo tanto, dentro de la escuela asiática podría distinguirse a su vez dos tendencias diferentes que, aun cuando comparten en esencia su base metodológica, enfocan el problema desde dos posiciones diferentes: 1) En la primera están más centrados en los conceptos de “*ciudad portuaria*” y/o “*región portuaria*” tratando de establecer las relaciones entre economía y puertos y en algunos casos proponiendo políticas concretas de cooperación y coordinación entre diferentes puertos y; 2) una segunda tendencia centrada definitivamente en el desarrollo de “*puertos verdes*” en los que se tratan de poner en contrapunto impactos positivos del desarrollo portuario (medidos usualmente en términos de la relación entre movimiento portuario y riqueza regional / desarrollo económico) con sus externalidades (consumos, contaminación, ocupación de costa, etc...) y presentando por tanto el método como una herramienta de apoyo a la decisión enmarcado en una política de desarrollo sostenible.

Las escuelas croata y asiática no han sido los únicos grupos de investigadores que se han adentrado en estos sistemas en ambiente portuario.

Oztanriseven *et al.* (2014), presentaron en un foro abierto el informe interno de la Universidad de Misuri (Misuri, Estados Unidos) que realizaron Long *et al.* (2014)²⁰⁵ y en el que recogen una reciente revisión de la utilización de SD en el campo del transporte marítimo; dividiéndolos en tres áreas conceptuales de interés como son: i) estudios relacionados con la operación de puertos / terminales; ii) estudios centrados en la operación de barcos / optimización de rutas / compañías navieras y mercado de fletes; y, iii) estudios relacionados con temática de análisis de riesgos y crisis / accidentes / desastres naturales, etc. y recuperación de estados operativos tras dichos eventos extraordinarios.

Del análisis de su artículo (aunque sin citarlo estos autores) y de la consulta de otras referencias bibliográficas se puede establecer una cuarta categoría que sería: iv) estudios del impacto económico de los puertos en su área de influencia; temática muy estudiada por otros autores bajo otros esquemas y en cuyo grupo podrían citarse gran parte de las investigaciones publicadas por la escuela asiática.

A continuación se dedicará un apartado explicativo para cada uno de los grupos que se acaban de enunciar.

3.4.1.1 Análisis de operación en terminales y contextos portuarios utilizando SD.

Para Oztanriseven *et al.* (2014), los investigadores que han utilizado modelos SD dentro del primer grupo (contextos de operación en puertos y terminales) pueden clasificarse a su vez en dos subcategorías: i) las que se centran en los procesos de manipulación de mercancías (“*port-handling*” en literatura anglosajona) y/o las operaciones en atraque o en zona de almacenamiento (“*berth or yard operations*”; y, ii) los que focalizan sus investigaciones en aspectos económicos de los puertos (“*port economics*” en literatura anglosajona).

Dentro de este primer subapartado y en la subclase de “*port handling*” citan expresamente algunas de las realizaciones (no todas) de los autores de la escuela croata antes señaladas. En concreto: Munitic *et al.* (2003b), Dvornik *et al.* (2006) y Dunvovic *et al.* (2009); mientras que en la subclase de “*berth or yard operations*” ponen como ejemplo a Cheng *et al.* (2010).

Sin embargo existen muchos otros autores que utilizan estos métodos y que no han sido destacados en el estudio de Oztanriseven *et al.* (2014). A continuación se presenta una breve

²⁰⁵ Ambos artículos son prácticamente idénticos. En esta tesis, estos trabajos se refieren como Oztanriseven *et al.* (2014) pero indistintamente podrían citarse como Long *et al.* (2014) pues no se conoce cual es el primero de los dos.

descripción de alguno de los más relevantes o novedosos ampliando por tanto el alcance de las investigaciones de estos últimos autores.

En Munitic *et al.* (2003b), Dvornik *et al.* (2006) y Munitic *et al.* (2007) (dichos artículos son prácticamente idénticos aunque publicados en diferentes medios o presentados en diferentes foros) los autores presentan un modelo completo del comportamiento de una terminal de transbordo de contenedores utilizando SD. En primera instancia presentan un modelo elemental para ayudar a explicar el proceso (ilustración 58) para después proporcionar un modelo estructural complejo (ilustración 59) que es el que implementarán con la ayuda del software Professional Dynamo 4.0 y PowerSIM estableciendo el sistema definitivo que se muestra en la ilustración 60 y del que los autores proporcionan los códigos completos introducidos en dicho software (algo que destaca por inusual en este tipo de difusión científica).

Los autores definen en el sistema tres actividades fundamentales: 1) la llegada de barcos y la ocupación de los muelles por parte de éstos; 2) la operación (carga/descarga) de los barcos en el muelle; y, 3) el transporte de la mercancía descargada a remolques, camiones y almacenes.

Continúan explicando los autores como su modelo hace depender la operación de los barcos de: 1) el número de muelles disponibles; 2) el número y capacidad de las grúas con que está equipada la terminal; 3) el número y la capacidad de los elementos de transporte horizontal; y, 4) el número y capacidad de los almacenes.

Los autores también señalan que en su modelo aplican el principio de mantener la operación de un barco ininterrumpida. Esto lo implementan de tal modo que siempre que haya medios suficientes para realizar una operación, ésta se realiza y si por cualquier circunstancia alguno de los medios no está disponible (muelle, medios de transporte horizontal, camiones, remolques o almacenes) la operación permanece interrumpida hasta que nuevas capacidades quedan liberadas y pueden ser asignadas (algo que se hace tan pronto como es posible).

Como se puede observar en el modelo completo (ilustración 59) cinco referencias circulares dominan el proceso que tienen que ver con: 1) el estado de ocupación del atraque y la velocidad de despacho del buque (“FBL1”); 2) el estado de carga en el muelle y la velocidad de carga de los elementos de transporte horizontal (fork-lifts) (“FBL2”); 3) el estado de carga en remolques y velocidad de carga de dichos remolques (“FBL3”); 4) el estado de carga en camiones y velocidad de carga de dichos camiones (“FBL4”); y, 5) el estado de mercancía cargada en almacén y velocidad de remisión de carga a dicho almacén (“FBL5”).

Ilustración 59. Modelo estructural para simulación de una terminal de contenedores mediante SD.

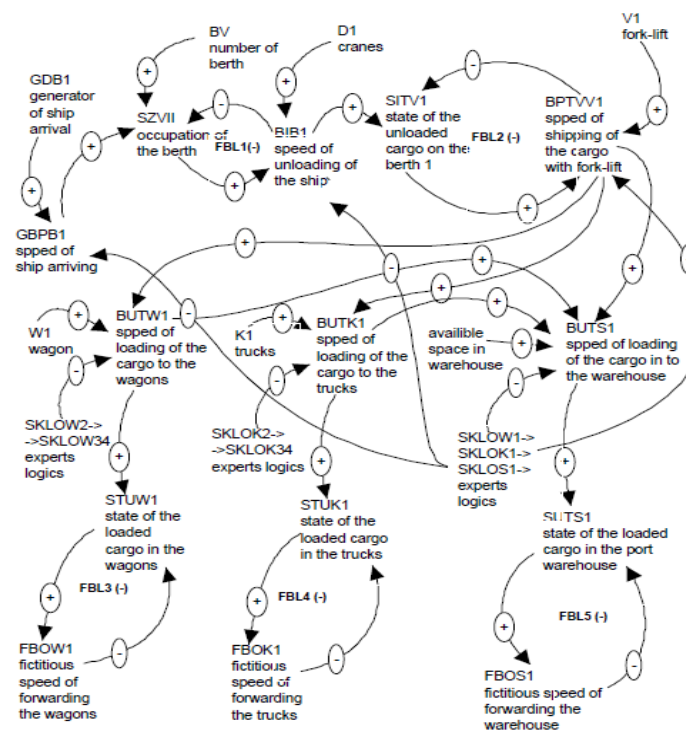
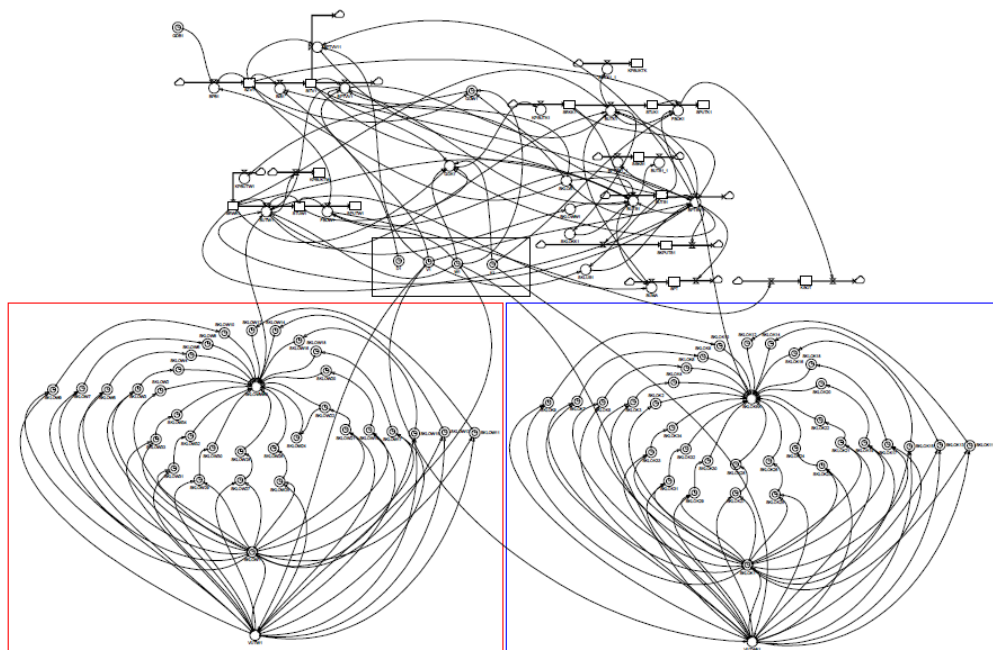
Fuente: Munitic *et al.* (2003b).

Ilustración 60. Sistema completo de una terminal de contenedores modelado en POWERSIM.

Fuente: Munitic *et al.* (2003b).

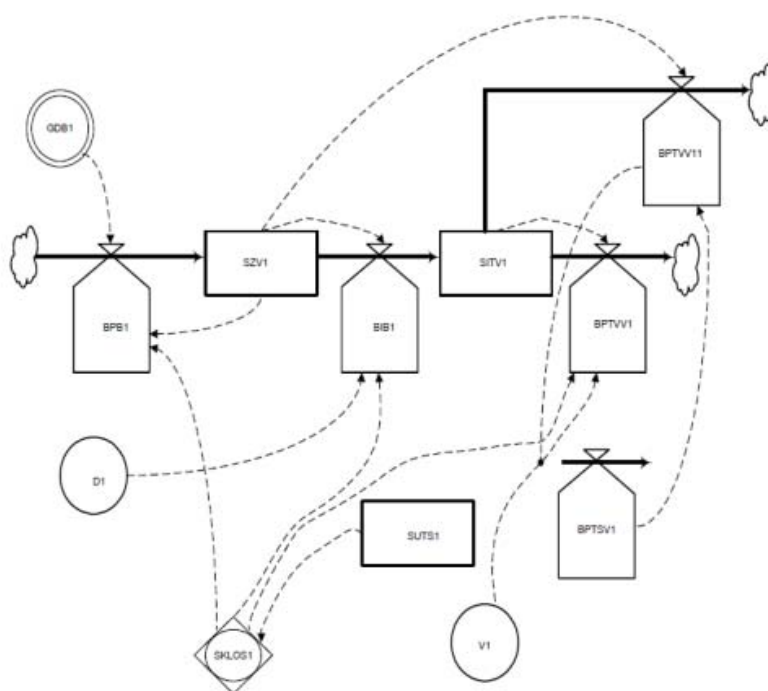
Estos trabajos que acaban de mencionarse tuvieron seguramente un antecedente en Munitic *et al.* (2003a) y probablemente en Munitic *et al.* (2002). No se ha podido tener acceso al artículo del

año 2002 y simplemente se puede referenciar en este trabajo por las citas que del mismo se hace en estos artículos posteriores.

El artículo del año 2003, escrito en Croata, es aparentemente parecido en estructura y contenido a los restantes de la serie.

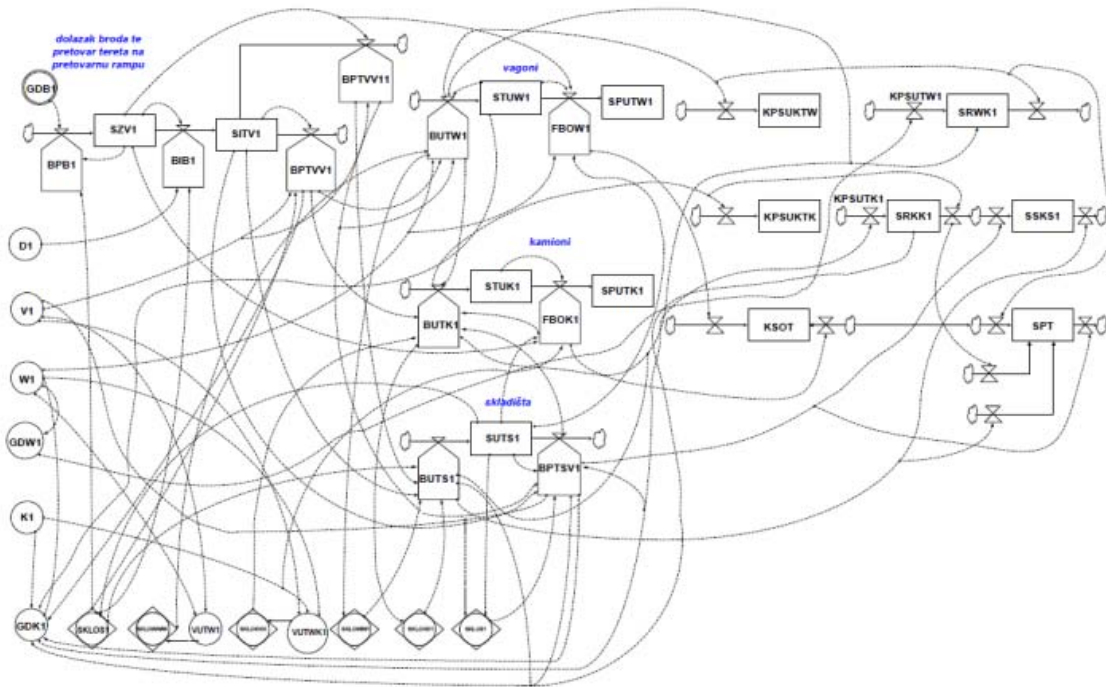
Sin embargo, éste es algo más extenso que los posteriores y presenta una mayor explicación del cuerpo del modelo introduciendo no sólo los códigos completos sino gráficos explicativos adicionales inéditos en los siguientes artículos (ilustración 61 en el que representan el diagrama de flujo correspondiente a la operación de ataque y el diagrama completo de simulación que se representa en la ilustración 62, ambos no incluidos en ponencias posteriores).

Ilustración 61. Diagrama de flujo de la operación de ataque.



Fuente: Munitic *et al.* (2003a)

Ilustración 62. Diagrama completo de simulación.

Fuente: Munitic *et al.* (2003a)

Munitic *et al.* (2003c) resulta una nueva entrega de la serie de artículos de los mismos autores en los que los investigadores siguen presentando la aplicación de modelos SD en una terminal de transbordo de contenedores. En este artículo, los autores también presentan los diagramas completos utilizados en la codificación del modelo en el lenguaje de simulación Dynamo; al tiempo que introducen tres funciones lógicas (denominadas por los autores KLOK, SKLOW y SKLOS) que sirven para armar el modelo.

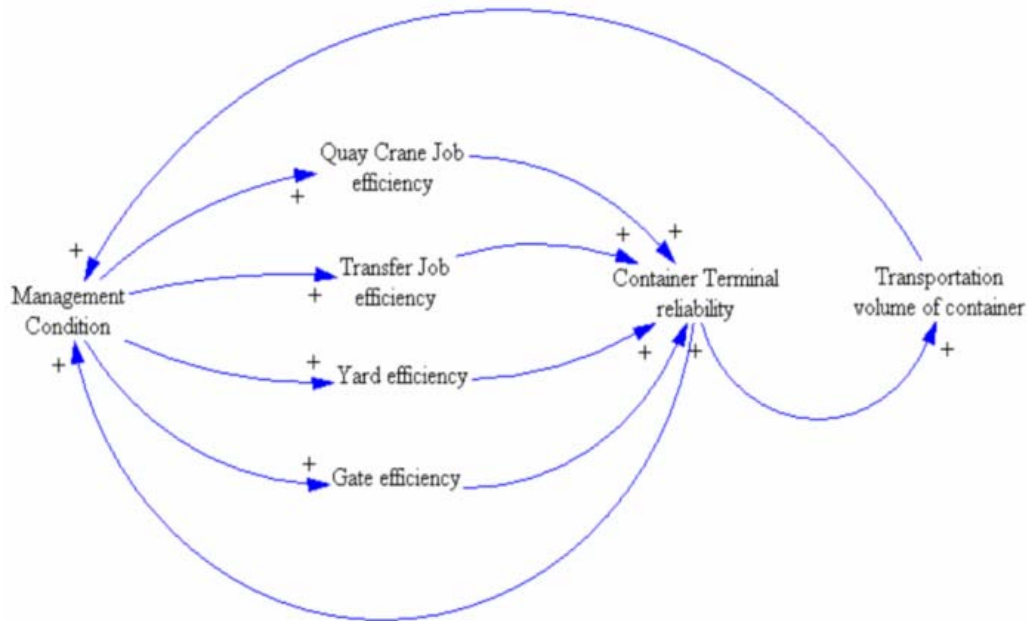
Choi *et al.* (2007) analizan diversos factores que afectan a la competitividad de una terminal de contenedores, establecen las relaciones entre ellas y las abordan con un modelo SD para, en un horizonte de largo plazo, simular cuál va a ser la evolución del puerto y de todas estas variables.

Para estos autores en cada momento se definen unas condiciones de operación en la terminal que vienen determinadas por la eficiencia de las grúas, las operaciones de transporte horizontal de contenedores desde muelles a patio, la eficiencia de la propia área de depósito y el de la puerta de entrada / salida de contenedores en la terminal.

Las eficiencias de estos cuatro factores determinan en su conjunto cual es la fiabilidad de la terminal o el puerto. Cualquier mejora en la eficiencia de uno de esos elementos individuales puede ayudar a incrementar la fiabilidad del conjunto lo que, de una manera sinérgica y acumulativa, puede favorecer la atracción de tráfico.

Con estos nuevos tráficos el puerto tendrá mayores ingresos y podrá reinvertir en nuevas mejoras de eficiencia que definirá una nueva situación operativa. Este simple esquema “virtuoso” lo representan en el diagrama causal de la ilustración 63.

Ilustración 63. Diagrama casual (“casual loop”) de los trabajos de una terminal y su fiabilidad.



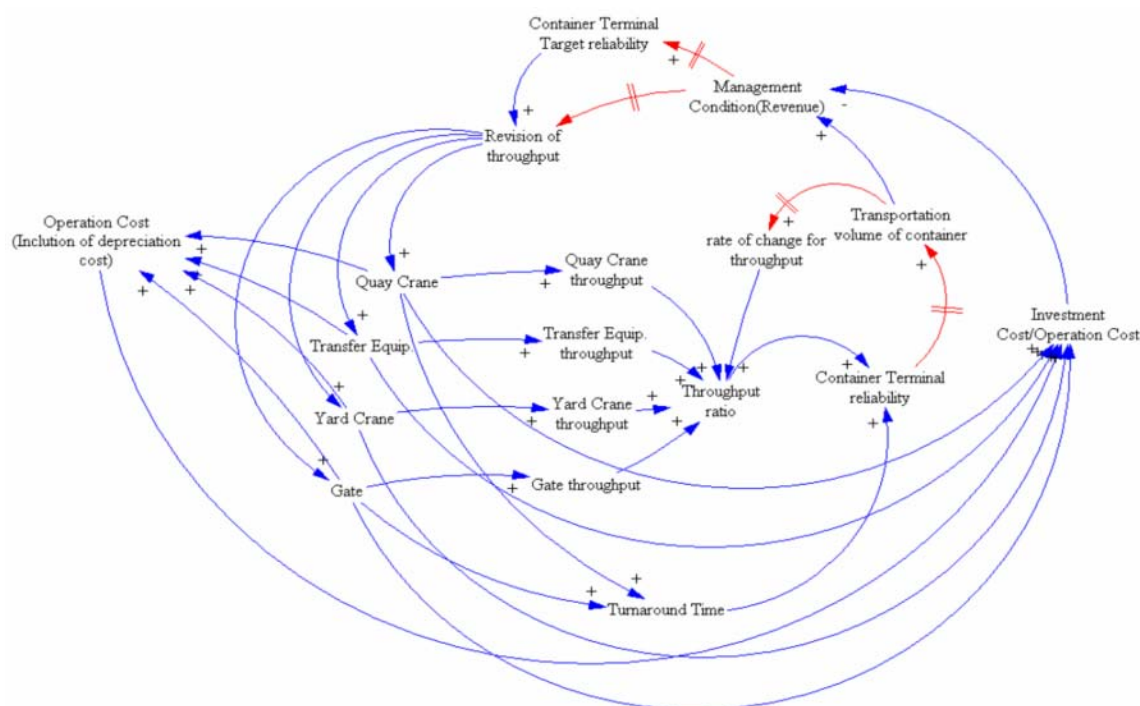
Fuente: Choi *et al.* (2007).

Este modelo simple que presentan en una primera aproximación lo desarrollan de una manera más detallada en un nuevo diagrama de causalidad que es el que utilizan para programar el modelo SD (ilustración 64), presentando finalmente resultados en cuanto al tiempo de despacho (representado en la ilustración 65 como “TT” de “*turnaround time*”), fiabilidad de la terminal (“*reliability*” en la ilustración 66) y volumen total de mercancía (ilustración 67).

En esta investigación plantean una simulación de largo plazo (50 años) en la cual el tráfico de la terminal va creciendo hasta que se alcanza un límite máximo teórico en el que las limitaciones físicas impiden la expansión de la terminal y los condicionantes de implantación impiden introducir más equipamiento (conceptualmente lo que podría definirse como tráfico de saturación de la terminal). Durante este tiempo se van mejorando paulatinamente tanto los tiempos de despacho como la fiabilidad de la terminal.

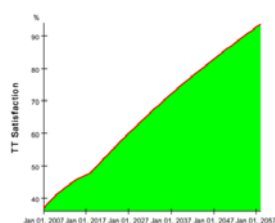
No explican, sin embargo, los autores como este último parámetro presenta un periodo de decrecimiento aproximadamente a la mitad del escenario de simulación (ilustración 66) que bien podría ser a nuestro entender una pérdida de eficiencia de determinado equipamiento al final de su vida útil que se recupera una vez que dichos activos se renuevan.

Ilustración 64. Diagrama de causalidad (“causal loop”) entre equipamiento e infraestructuras de una terminal y su fiabilidad.



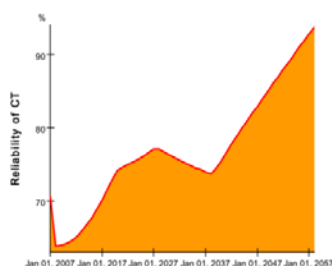
Fuente: Choi *et al.* (2007).

Ilustración 65. Variación en el tiempo de despacho (expresado en grado de cumplimiento de los objetivos impuestos).



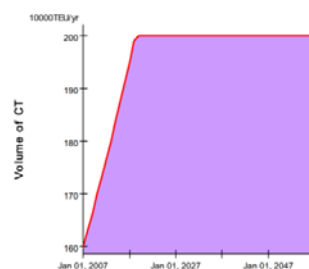
Fuente: Choi *et al.* (2007).

Ilustración 66. Variación en el tiempo de la fiabilidad de una terminal de contenedores.



Fuente: Choi *et al.* (2007).

Ilustración 67. Volumen movido por la terminal.



Fuente: Choi *et al.* (2007).

Cabe destacar también el trabajo de Lattila (2008), bajo la supervisión de Markku Tuominen (Universidad de Lappeenranta, Finlandia), quien en su tesis doctoral realiza una interesante integración de simulación SD con sistemas avanzados de previsión de tráfico²⁰⁶ y modelos de

²⁰⁶ En la parte de análisis de demanda utiliza tanto clásicos y simples modelos de regresión lineal como modelos más sofisticados conocidos como ARIMA (*autoregressive integrated moving average*)

demanda portuaria que aplica como ejemplo práctico a puertos de Finlandia con un objetivo temporal de largo plazo (30 años).

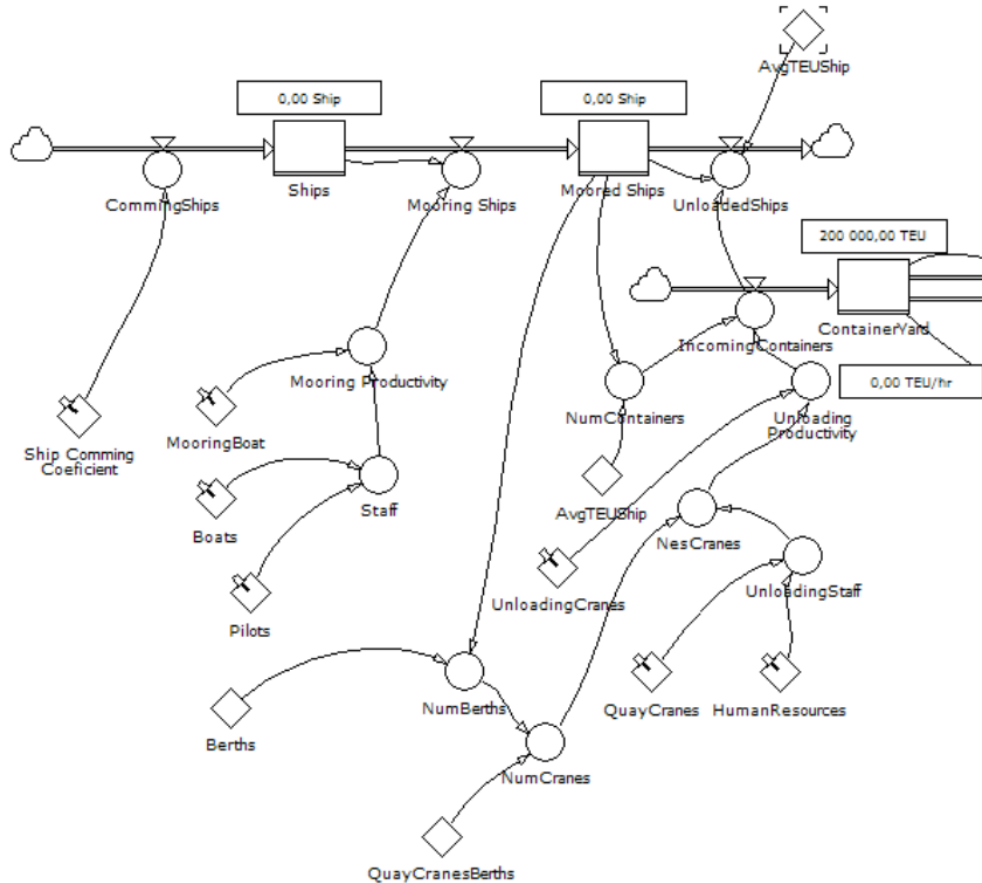
En el modelo global realizado se analizan diferentes escenarios e introduce análisis estadístico con intervalos de confianza. En la parte relativa a modelización SD, el autor utiliza el software VenSim ®.

Revetria *et al.* (2008) y Briano *et al.* (2008 y 2009), del grupo de investigación del Departamento de ingeniería de la producción, termo-energética y modelos matemáticos de la Universidad de Génova (Italia), presentan un ejemplo práctico de aplicación SD en la terminal de Voltri, mayor terminal de contenedores del puerto de Génova (Italia) utilizando como software de soporte *PowerSim Studio 7 Express* ©. El modelo de estos autores se divide en tres partes o módulos.

El primero es el encargado de generar la llegada de barcos y conectarlos con la aplicación de amarre y procedimientos de descarga y almacenamiento (ilustración 68). En este se definen tres niveles denominados “*Ships*”, “*Moored Ships*” y “*Container Yard*” en los que respectivamente se acumulan los barcos que llegan a puerto y quedan a la espera de ser operados (“*Ship*”), los barcos que están en operación (“*Moored Ships*”) y los contenedores de entrada y salida que están acumulados en la terminal (“*Container Yard*”).

En el modelo se incluyen diversos elementos auxiliares como los remolcadores (“*Boats*”), prácticos (“*Pilots*”), amarradores (“*Mooring Boat*”) atraques disponibles (“*Berths*”), número de grúas (“*NumCranes*”), mano de obra portuaria (“*Human Resources*”), etc., que definen tanto los procesos de productividad en el atraque (“*Mooring Productivity*”) como en la descarga (“*Unloading Productivity*”) y que junto con el número de contenedores a descargar (“*NumContainers*”) definen el número de contenedores que se depositan y almacenan en la terminal para ser posteriormente despachados como contenedores de importación (“*Incoming Containers*”).

Ilustración 68. Diagrama del módulo de amarre y descarga.



Fuente: Revetria *et al.* (2008).

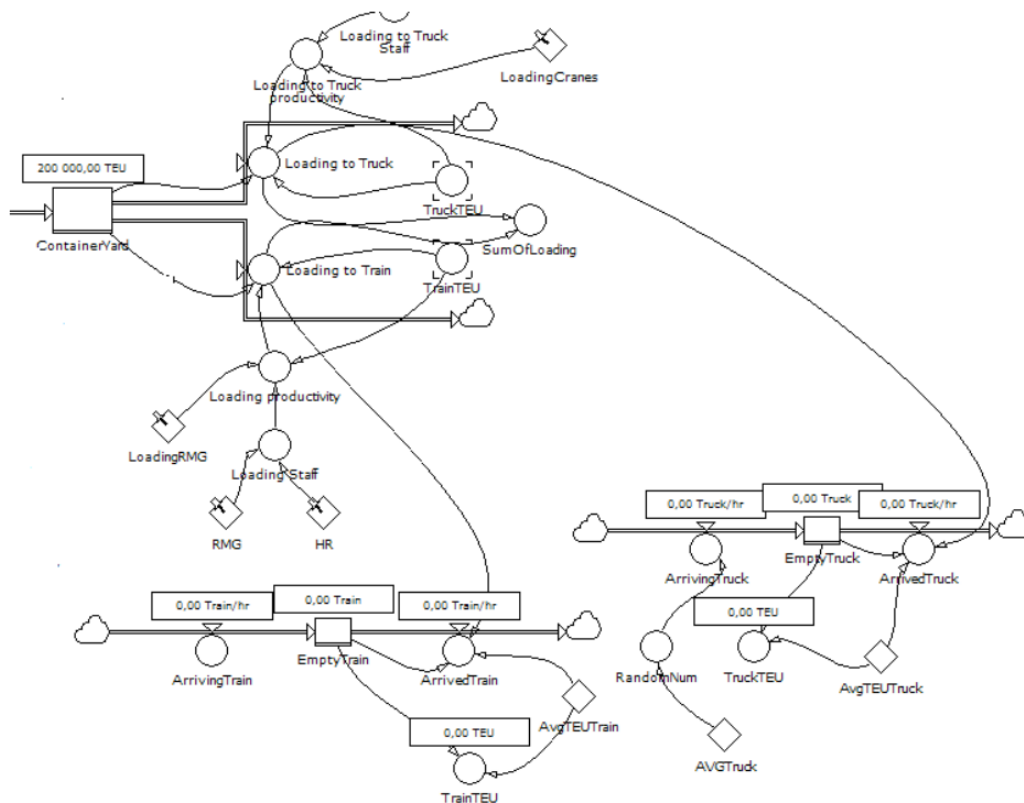
El segundo y tercer módulos (ilustración 69) son los encargados de reproducir los procesos de despacho y salida de contenedores de importación (carga en camiones y trenes) y el propio proceso de operación en el patio.

La ley de llegada de trenes y camiones se genera en diferentes variables auxiliares (“*ArrivingTrain*” y “*ArrivingTruck*”) que a su vez y como pasaba con los barcos quedan a la espera de ser atendidos en otras tantas variables auxiliares (“*EmptyTrain*” y “*EmptyTruck*”). El número de contenedores que deben cargarse en cada tren o camiones se contabilizan otras tantas variables (“*TrainTEU*” y “*TruckTEU*” respectivamente) al tiempo que un tren o camión que entran en operación cambian de estado y los valores se acumulan en otras variables auxiliares (“*ArrivedTrain*” y “*ArrivedTruck*”).

Para avanzar en el proceso de carga existe una rutina de control del proceso (“*Loading productivity*”) que depende del equipamiento de la terminal y sus capacidades; en concreto del número de grúas en patio (“*RMG*”), recursos humanos asignados al patio para realizar las tareas

(“HR”) y rendimientos de dichos medios; tanto de los mecánicos (“*LoadingRMG*”) como los humanos (“*Loading Staff*”).

Ilustración 69. Diagrama del módulo de despacho de salida de contenedores de importación (carga de camiones y trenes).



Fuente: Revetria *et al.* (2008).

El trabajo de Dundovic *et al.* (2009) constituye una evolución de los trabajos previos de la escuela croata en lo que se refiere a la modelización de terminales de transbordo de contenedores (ya descritos en Munitic *et al.* , 2003b, 2003c y 2007 y en Dvornik *et al.*, 2006). Estos autores estudian un ejemplo experimental muy concreto en el puerto de Šibenik (Croacia) en relación a la descarga de un barco de granel (descarga de 32.250 toneladas de fosfato del barco *Pakrac*).

Los autores utilizan como software de apoyo *PowerSIM Studio* ® y analizan dos escenarios alternativos con diferente equipamiento de la terminal que se comparan con los resultados reales obtenidos con el equipamiento de la terminal (que se emplea como elemento de calibración del modelo).

Li *et al.* (2010a) estudian el papel que juegan los puertos dentro de la cadena de suministro y la gran influencia que la capacidad portuaria tiene en dichas cadenas. Para ello, mediante su modelo

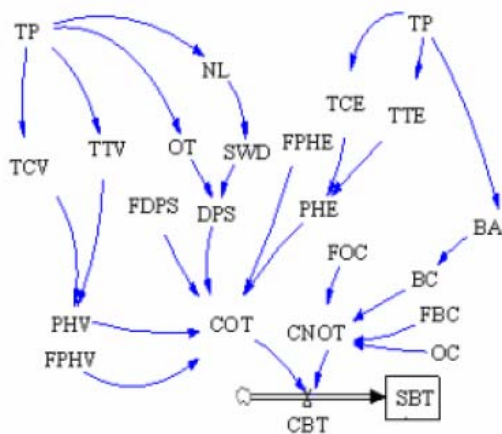
detectan cuellos de botella en el puerto dentro de la logística de una empresa y mediante escenarios de simulación con diferentes niveles de inversión y las mejoras introducidas que determinan los beneficios generados. Estos autores utilizan en su modelización el software comercial *Simulink*®.

Sha y Huang (2010) modelan una terminal de contenedores mediante un innovador enfoque de división en tres subsistemas conceptuales: a) tiempo; b) seguridad /calidad; y, c) beneficio. Estos subsistemas responden a los tres objetivos de la terminal: 1) garantizar el tiempo de servicio; 2) mejorar la calidad del servicio; y, 3) reducir el coste del servicio.

- El subsistema de tiempo (“*TS*”) se divide en dos campos, uno donde se registran y analizan los datos de tiempo de estancia del barco en puerto o “*SBT*” de “*Ship-Berth-Time*”) (ilustración 70) y el tiempo de estancia de la mercancía en la terminal o “*CPT*” de “*Cargo-Port-Time*”, (ilustración 71).
- El subsistema de calidad y seguridad o “*QS*” de “*Quality System*” (ilustración 72) se evalúa utilizando factores como son: el grado de incidencia de accidentes en trabajos portuarios, el ratio de trabajos que se efectúan en tiempo (servicios en tiempo / total de servicios), el ratio de daños en mercancías (mercancías dañadas / mercancías totales), la calidad (subjetiva) percibida por los usuarios, etc...
- En el subsistema de beneficios o “*PS*” de “*Profit System*” (ilustración 73) se consideran los resultados de todos los agentes que actúan en el puerto (no solo la Autoridad Portuaria sino por ejemplo empresas estibadoras, almacenistas, agentes,...) y se define una función de estimación como diferencia entre los ingresos de estas compañías (tasas y tarifas portuarias, tarifas por servicios portuarios,...) y los costes de sus operaciones (fijos y variables: costes de infraestructura, costes de combustibles, mano de obra,...).

En cada uno de los sistemas se definen un conjunto amplio de variables junto con todas las relaciones entre ellas, tal y como se presentan desde la ilustración 70 a la ilustración 73.

Ilustración 70. Tiempo de barco en puerto en el subsistema de tiempo ("TS") en modelización dinámica.



Fuente: Sha y Huang (2010).

SBT: the ship's berth-time.

CBT: changes in the berth-time of the ship.

CNOT: changes in the non-operational berth-time of the ship.

COT: changes in the operational berth-time of the ship.

FPHV: the impact factor of PHV.

FDPS: the impact factor of DPS.

FPHE: the impact factor of PHE.

TP: the throughput of the port.

TCV: the total tonnage of cargoes loaded-unloaded by vehicles.

TTV: the total loading-unloading time of vehicles.

OT: operation tons.

NL: the numbers of labours.

SWD: the stevedores' work days.

TTE: the total operating time of loading-unloading equipment.

TCE: the total tonnage of cargoes handled by loading / unloading equipment.

BA: berths resource allocation.

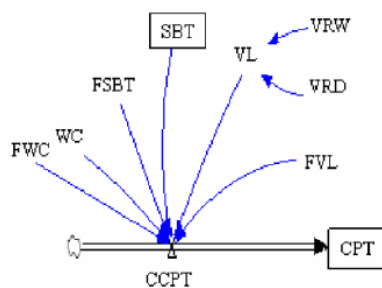
BC: causes of berths.

FBC: the impact factor of berths.

OC: other causes.

FOC: the impact factor of other causes.

Ilustración 71. Tiempo de mercancía en puerto en el subsistema de tiempo ("TS") en la modelización dinámica.



Fuente: Sha y Huang (2010).

FWC: the impact factor of warehouse capacity.

FSBT: the impact FSBT.

FVL: the impact factor of collecting and distributing volume by land.

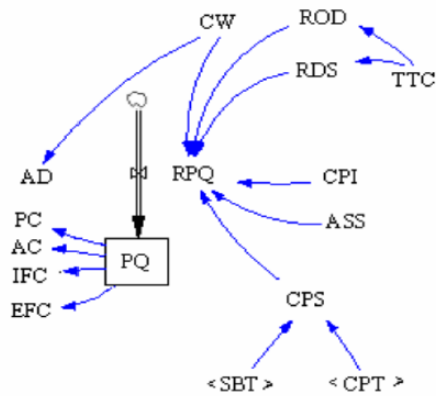
VRD: the collecting and distributing volume by road.

VRW: the collecting and distributing volume by railway.

CCPT: changes in the average cargoes' port-time.

B. Submodel for QS.

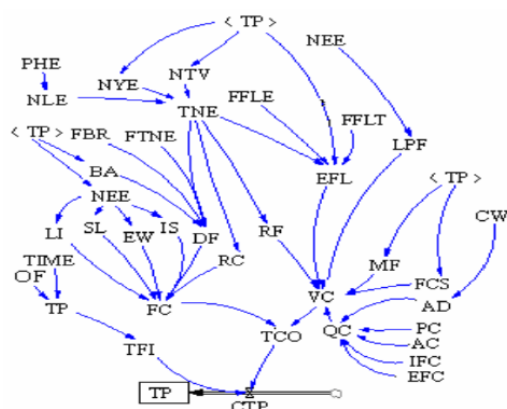
Ilustración 72. Subsistema de calidad y seguridad (“QS”) en la modelización dinámica.



Fuente: Sha y Huang (2010).

- AD: accident damages.
 - PC: prevention costs.
 - AC: appraisal costs.
 - IFC: internal failure costs.
 - EFC: external failure costs.
 - PQ: the port quality.
 - RPQ: the rate of change in port quality.
 - CW: casualty of workers.
 - ROD: on-time delivery rate.
 - RDS: the rate of freight damage and shortage.
 - TTC: the total tonnage of cargoes.
 - CPI: the customs’ psychological impression.
 - ASS: the after-sales service.
 - CPS: the convenience of port services.
- C. Sub model for PS

Ilustración 73. Subsistema de beneficios (“PS”) en la modelización dinámica.



Fuente: Sha y Huang (2010).

- LI: the labor insurance.
- SL: the salary.
- EW: employee welfares.
- DF: depreciation fees.
- IS: the insurance.
- RC: the rent charge.
- FC: fixed costs.
- LPF: the labor protection fee.
- EFL: the expenditure on fuel and lubricant.
- RF: repairing fees.
- MF: management fees.
- FCS: finance costs.
- VC: variable costs.
- QC: quality costs.
- TCO: the total costs of operations.
- NLE: the number of loading-unloading equipment.
- NYE: the number of yards equipment.
- NTV: the number of transportation vehicles.
- TNE: the total number of equipment.
- FFLE: the impact factor of fuel and lubricant affected by the equipment.
- FFLT: the impact factor of fuel and lubricant affected by the throughput.
- FBR: the impact factor of berth recourse allocation.
- FTNE: the impact factor of the total number of equipment.
- NEE: the total number of employees.
- TFI: the total freight income.
- TP: total profits.
- CTP: Changes in the amount of total profits.
- OF: other factors.

Si bien definen el modelo en un plano conceptual lo aplican a un caso concreto sobre la terminal de contenedores del Puerto de *Lianyungang* (China) en base a datos reales entre los años 2001 y 2007, realizando proyecciones para los 10 años siguientes (2007/2017).

Los autores en el artículo sólo ofrecen como ejemplo los resultados que se obtienen en dos escenarios (situación actual y situación tras una mejora de equipamiento en un 10%) y dos variables concretas como son el tiempo de barcos en atraque y el coste total de las operaciones.

Sobre las bases conceptuales e hipótesis descritas y en el escenario experimental escogido, sus conclusiones eran que una vez mejorado el equipamiento se conseguía una disminución sustancial del tiempo de estancia en puerto pero, sin embargo, la mejora en términos de coste era muy limitada (la mejora de la eficiencia que se traduce en menores tiempos se veía compensada con el coste del nuevo equipamiento); efectos ambos que se ponían de manifiesto fundamentalmente en el medio y largo plazo (coincidiendo con el incremento de tráfico).

Caballini *et al.* (2012) extrapolan el concepto de “*sistema de sistemas*” a ambientes portuarios²⁰⁷. Efectivamente, estos investigadores definen un puerto como un conjunto de subsistemas que interactúan entre sí e incluso llegan a compartir recursos, de manera que los resultados y objetivos de un subsistema afectan a los otros. El conjunto de subsistemas conforman un propio sistema (puerto) y es posible estudiar el comportamiento y evolución de éste mediante la adecuada formulación del comportamiento de los subsistemas que lo componen y las interacciones entre ellos. Es cierto además que el sistema no puede funcionar si no lo hacen los subsistemas que lo conforman.

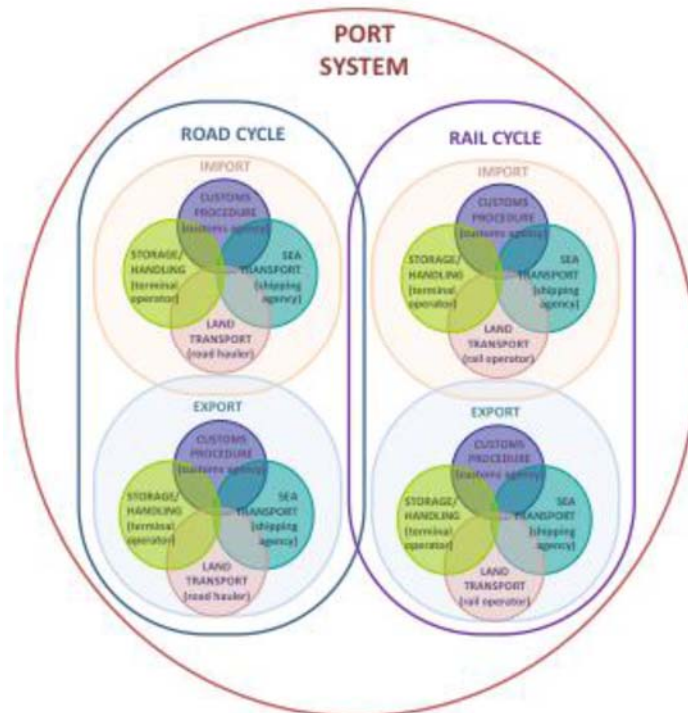
Las autores empiezan describiendo como en el puerto se pueden diferenciar dos subsistemas a través de los cuales la mercancía llega o abandona el puerto: el formado por el ciclo de camiones y barcos (“*truck-ship*” también referido a veces como “*road cycle*”) y el formado por el de trenes y barcos (“*train-ship*” también referido a veces como “*rail cycle*”); describiendo los autores como este segundo (el que concierne al ferrocarril) resulta un subsistema más complejo por el tipo de procedimientos, actores involucrados y gestión que requiere a los encargados de la terminal.

A su vez existen dos flujos diferenciados: importación (“*import cycle*”) por el que la mercancía llega a puerto por vía marítima y el de exportación (“*export cycle*”) por el que la mercancía sale del puerto por la misma vía.

Estos dos subsistemas de importación y exportación pueden ser discretizados en otros cuatro subsistemas tal y como se muestra en la ilustración 74: 1) procedimientos de expedición y aduanas (“*customs procedure*”); 2) el de transporte marítimo (“*sea transport*”); 3) el de almacenamiento y manipulación de la mercancía en la terminal (“*storage/handling*”); y, 4) los procesos de transporte terrestre (“*land transport*”).

²⁰⁷ El concepto de “sistemas de sistemas” había sido ya descrito entre otros por Simpson y Dagli (2008); Karcianas y Hessami (2010a y 2010b) y Mostafavi *et al.* (2011) aunque en entornos no portuarios

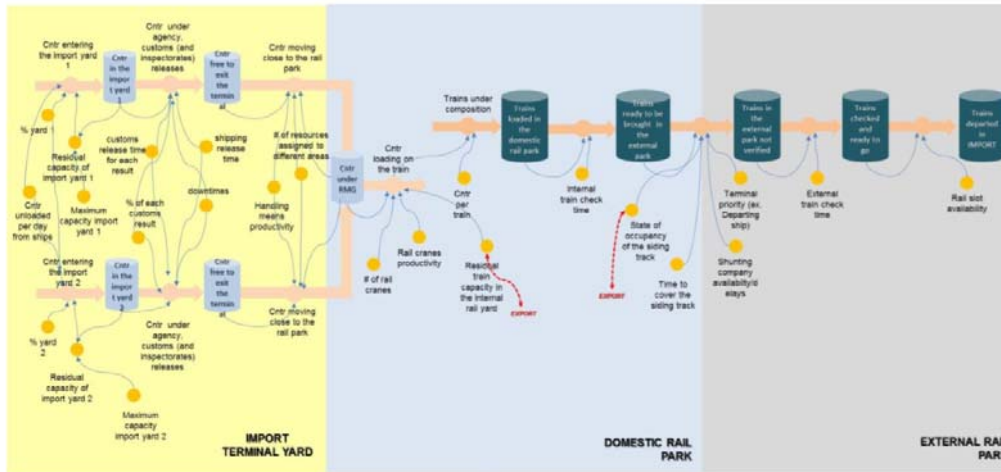
Ilustración 74. Subsistemas y sistemas en puerto.



Fuente: Caballini *et al.* (2012).

Una descripción gráfica más completa del detalle del modelo SD para el ciclo de importación según estos autores se recoge en la ilustración 75.

Ilustración 75. Modelo conceptual SD para el ciclo de importación a través de ferrocarril.



Fuente: Caballini *et al.* (2012).

Los autores aplican sus estudios a tres terminales de contenedores en Italia y se vuelven a apoyar en el software *PowerSim* © determinando los cuellos de botella de las terminales y proponiendo mejoras concretas para eliminarlos.

Park *et al.* (2012a) investigan mediante técnicas SD la evolución del transbordo de contenedores en el puerto de Busan (Corea del Sur)²⁰⁸. En un primer paso los autores tratan de describir un modelo cuantitativo de la evolución de dicho tráfico en la década previa al estudio para más tarde y en un paso intermedio tratar de encontrar la dependencia y significación estadística que relaciona el tráfico de contenedores y un número de variables económicas (utilizando para ello un análisis de regresión múltiple y la opinión de diversos expertos y usuarios del puerto conocedores de los tráfico).

Una vez que dichas relaciones son analizadas y se escogen las variables que presentan significación estadística y desechan las que no presentan una dependencia estadística clara, construyen el modelo SD propiamente dicho. Para ello relacionan el conjunto de variables seleccionadas y el volumen de tráfico del puerto. Como conclusiones, para estos autores dos son los elementos claves que más afectan al desarrollo del tráfico de transbordo en el puerto de Busan: el conocido como efecto “*Mohring*” y el coste total de transporte.

El efecto Mohring, que debe el nombre a Herbert Mohring de la Universidad de Minesota (Minesota, Estados Unidos) quien por primera vez lo identificó en Mohring (1972), es un fenómeno por el cual según va creciendo la frecuencia de un servicio (el autor centra su investigación en el estudio de transporte urbano y número de autobuses para satisfacer las necesidades de transporte) la demanda también crece por un efecto de llamada. Este efecto se

²⁰⁸ Sexto puerto del mundo por volumen de contenedores movido en 2015, con unos movimientos totales de 19.5 millones de TEU's (18.7 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

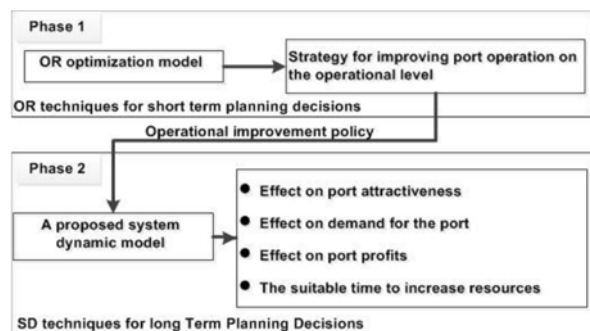
produce porque el tiempo de espera medio decrece y con ello también lo hace el coste medio generalizado del transporte (el usuario percibe el tiempo de espera como un elemento más de coste y si el tiempo medio total de transporte se reduce en relación a otro modo de transporte éste pasa a ser más competitivo).

Abdel-Fattah *et al.* (2013) realizan un modelo que estructuran en dos fases: una primera de optimización utilizando técnicas de investigación operativa basadas en modelos de eventos discretos y que se usan para las estrategias de operación a corto plazo y un segundo nivel (donde verdaderamente aplican los modelos SD) como elemento de toma de decisiones a largo plazo (ilustración 76).

En el primero presentan una aplicación puramente operacional, en la que resuelven con un enfoque conjunto los clásicos problemas de asignación de atraque (BAP) y de asignación de grúa en el muelle (QCAP) sobre lo que no es necesario extenderse aquí pues ya son objeto de otros apartados de esta tesis.

En el segundo (propiamente SD), con los resultados de optimización obtenidos en la primera fase integran los conceptos de “*atractividad*” del puerto con parámetros puramente operativos mediante un diagrama de causalidad (ilustración 77). Posteriormente toman en consideración un número elevado de parámetros que esquematizan mediante un diagrama de flujos y stocks (ilustración 78).

Ilustración 76. Modelo en dos fases: optimización y SD.



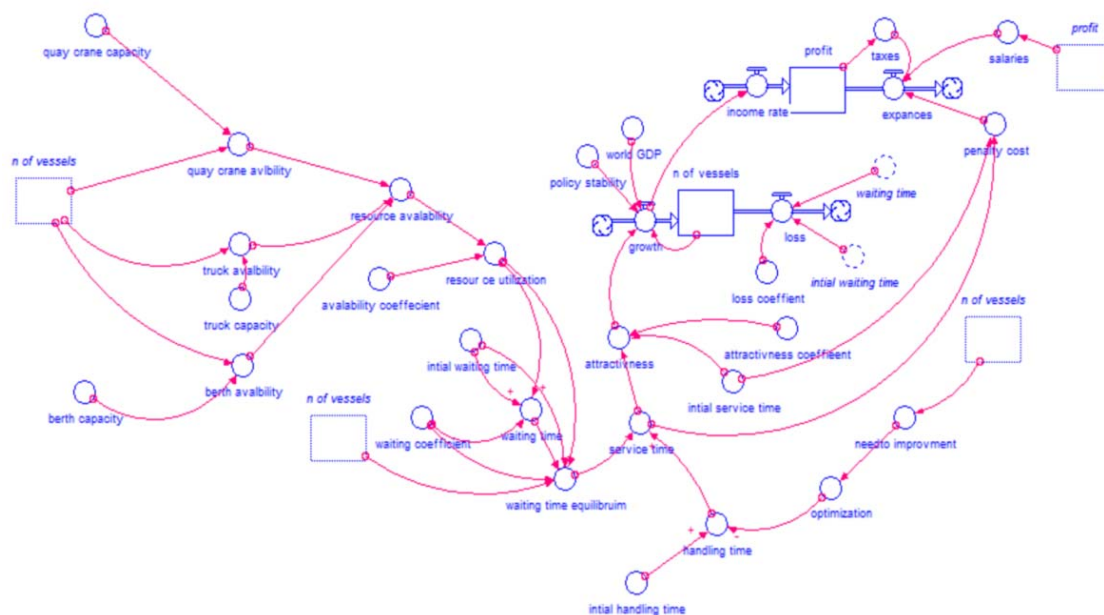
Fuente: Abdel-Fattah *et al.* (2013).

Ilustración 77. Diagrama *casual loop* propuesto para un modelo SD portuario.



Fuente: Abdel-Fattah *et al.* (2013).

Ilustración 78. Diagrama de flujos y stocks en modelo SD.



Fuente: Abdel-Fattah *et al.* (2013).

Para presentar las conclusiones de su estudio los autores no utilizan datos reales de ningún puerto, si no teóricos, y presentan resultados de cómo evolucionan ciertos parámetros en los siete años que toman como horizonte de simulación.

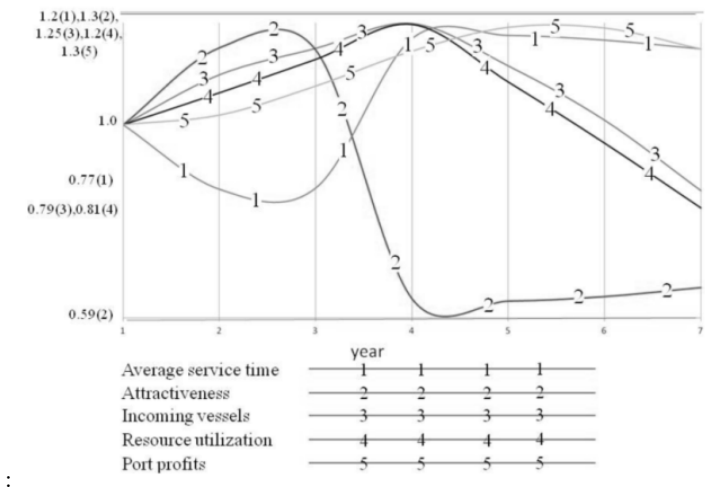
Los parámetros utilizados son el tiempo medio de servicio, el grado de utilización de los recursos; la que se ha denominado como “*atractividad*” del puerto, el número de barcos atendidos o el beneficio generado en las operaciones para el puerto.

Con en el diseño experimental que utilizan, concluyen que tras implementar medidas de optimización en el puerto: el tiempo de servicio decrece, lo que hace aumentar la “*atractividad*” del puerto y por tanto se genera un efecto de crecimiento de tráficos por efecto llamada (mayor número de barcos que recalán en puerto) y consecuentemente una mayor tasa de utilización de recursos y un incremento de los beneficios del puerto.

Sin embargo, llegado un punto, se alcanza una situación de cierta congestión e insuficiencia de medios que derivan en un incremento del tiempo de servicio y al efecto contrario (descenso de la “*atractividad*” del puerto, pérdida de tráficos y descenso del grado de utilización de recursos).

Los resultados obtenidos con el modelo parecen por tanto reproducir la lógica que sigue una terminal o puerto validando de manera conceptual los resultados obtenidos. Dichos resultados figuran en la ilustración 79.

Ilustración 79. Variación media de variables de control.

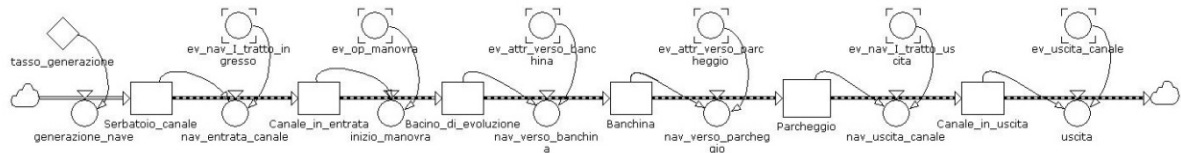


Fuente: Abdel-Fattah *et al.* (2013).

Guzzi *et al.* (2013) analizan el tráfico de un puerto y la capacidad de su canal de entrada en unas condiciones experimentales en el que el mismo se encuentra saturado. Para ello combinan técnicas de simulación SD con redes de Petri. Comienzan por modelizar la secuencia desde que un barco llega a puerto hasta que se encuentra atracado (ilustración 80) que desarrollan con mayor grado

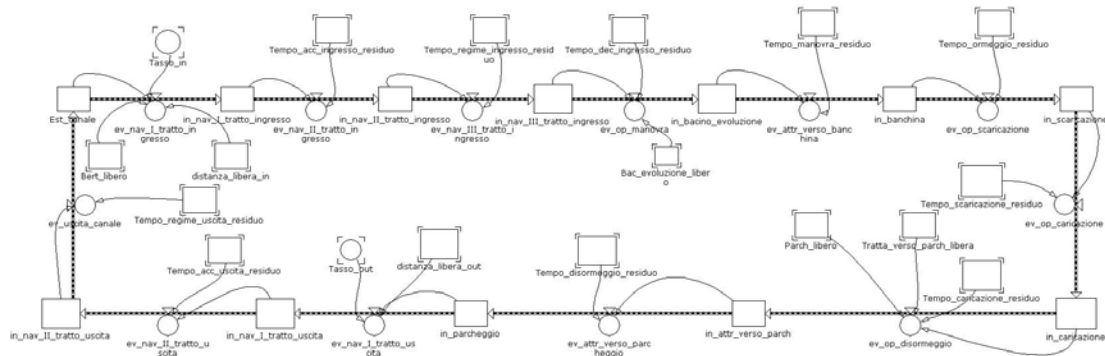
de detalle en una cadena de eventos sucesivos (ilustración 81) y que supone la mayor aportación de estos autores (integración de técnicas de redes de Petri en el propio sistema SD).

Ilustración 80. Flujo físico de movimiento de barcos



Fuente: Guzzi *et al.* (2013).

Ilustración 81. Cadena de eventos en la secuencia de movimiento de barcos.



Fuente: Guzzi *et al.* (2013).

El modelo que aplican corresponde a la lógica de secuenciación conocida como “*If ... then*” (es decir en el caso de que se dé una cierta condición entonces se procede en cierto sentido) incluye tanto restricciones y condicionantes de tipo físico (disponibilidad de atraque, distancias mínimas entre dos barcos que transitan por el canal,...) como temporales (tiempos necesarios para completar las acciones).

Estas restricciones se utilizan para hacer avanzar el modelo imponiendo limitaciones a la disponibilidad de medios y llegando a la interrupción de secuencias ante la insuficiencia de los mismos (barcos que quedan a la espera de que existan medios disponibles) y se codifican en diferentes rutinas de las que a continuación se presentan dos ejemplos gráficos como son la gestión de ataques (ilustración 82) y gestión de tiempos de maniobra (ilustración 83).

Ilustración 82. Rutina de gestión de atraques.

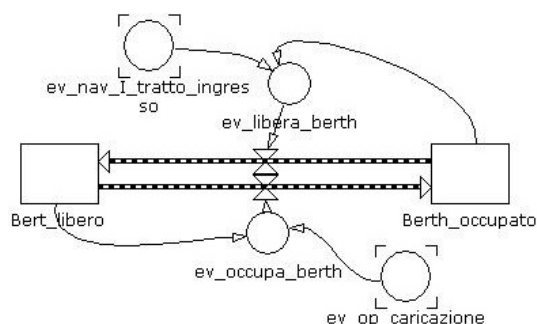
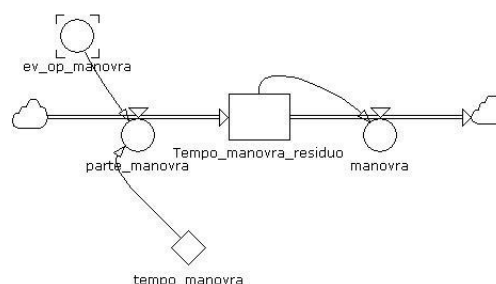
Fuente: Guzzi *et al.* (2013).

Ilustración 83. Rutina de gestión de tiempos de maniobra.

Fuente: Guzzi *et al.* (2013).

Estos autores realizan una aplicación práctica en cuatro escenarios distintos (pero no describen ni de qué caso se trata, ni cuáles son las diferencias entre cada uno de los escenarios) pero concluyen que las diferencias entre los resultados de cada escenario son muy parecidos (medidos en número de barcos totales que transitan en el canal) dando como explicación que el sistema está muy influenciado por la distancia de seguridad que deben mantener los barcos, lo cual no permite muchos grados de libertad al sistema y que el sistema estaba en una situación cercana a la congestión.

3.4.1.2 Análisis económicos portuarios y previsiones de tráfico utilizando modelización SD.

En lo que se refiere al conjunto de autores que analizan los conocidos en la literatura anglosajona como “*ports economics*” y que son citados en la revisión bibliográfica proporcionada por Oztanriseven *et al.* (2014) se encontrarían a Ho *et al.* (2008), Fu (2011a) y Li y Wang (2012).

Ho *et al.* (2008) estudian los efectos económicos de distintas decisiones de expansión portuaria llegando a interesantes conclusiones en el sentido de que aumentar el número de puertos no siempre tiene efectos económicos positivos si estas decisiones no van soportadas por medidas adicionales en relación a otras infraestructuras terrestres, conectividad de puertos con líneas marítimas o políticas de optimización de logística y de almacenamiento.

Fu (2011a) avanzó en la definición de las relaciones entre las decisiones de inversión portuaria, la capacidad portuaria y la contribución económica de los puertos a través de modelización SD, mientras que Li y Wang (2012) focalizan sus investigaciones en los efectos que en la economía regional tienen las infraestructuras portuarias proporcionando un interesante enfoque de integración entre modelos econométricos con matrices *input-output* y el propio modelo SD.

Sin embargo, estos tres autores citados por Oztanriseven *et al.* (2014) no son los únicos que se adentran en esta senda científica. Así, dentro de nuestra revisión bibliográfica intensiva se ha encontrado a: Ho *et al.* (2008), Carlucci y Cira (2009), Ng y Lam (2011), Pawlas y Zall (2012) y Wang *et al.* (2013a).

Aunque se rompa ahora el orden cronológico se empezará aquí por describir Pawlas y Zall (2012) por razones de claridad en la exposición. Estos autores realizan un extenso trabajo en el que utilizan sistemas SD (con apoyo del software comercial *VenSim*®) y programación genética. Realizan previsiones de capacidad de movimiento de contenedores a nivel país (lo aplican a dos escenarios experimentales como son las terminales de contenedores de China y Suecia) y los comparan con otras técnicas de previsión.

Dedican un interesante capítulo a describir el estado del arte en técnicas de predicción citando el estudio como técnicas representativas: 1) serie temporales²⁰⁹; 2) regresión lineal²¹⁰; 3) regresión no lineal²¹¹; 4) redes neuronales artificiales²¹²; 5) econometría²¹³; 6) SVM (“*Support Vector Machine*”)²¹⁴; y, 7) GT (“*Grey Theory*”)²¹⁵. Sin necesidad de extendernos en estos sistemas, sí que se quiere resaltar que tiene cierto interés para futuros estudios de revisión bibliográfica que quieran profundizar en este tipo de técnicas, la amplia tabla presentada como anejo (páginas 89 y 90 del estudio) en el que incluyen más de treinta referencias de otros tantos autores indicando cuáles de estas técnicas utilizan, año y ámbito geográfico.

Estos autores analizan las ventajas que un método SD introduce en el campo portuario con respecto a otros métodos clásicos, señalando que se obtienen buenos resultados porque se vencen restricciones inherentes a otros métodos. Citan como ejemplo el hecho de analizar más

²⁰⁹ Estudio de series temporales de una única variable o parámetro que se proporciona a intervalos regulares (p.e. tráfico de contenedores anual) y sobre la que se proporciona el valor futuro mediante el análisis de los valores pasados. Los métodos más sencillos están ampliamente extendidos en planificación portuaria existiendo determinadas variantes técnicas como son ARMA (“*Autoregressive Moving Average*”), ARIMA (“*Autoregressive Integrated moving average*”) y SARIMA (“*Seasonal Autoregressive Integrated moving average*”).

²¹⁰ Técnica muy usada en puertos en la que se estudia la realización lineal entre dos variables y por el comportamiento futuro de una se infiere el resultado esperado en la segunda. La correlación con el tráfico se establece normalmente con variables como PIB, índices de producción industrial o renta per cápita.

²¹¹ Método de regresión (estudio del comportamiento futuro de una variable a través de la relación que se establece con una segunda que sirve de predictor) en el que la relación entre la variable predictora y sometida análisis no es lineal. En ambientes portuarios ha sido por ejemplo utilizado por Ke *et al.* (2009) en el puerto de Nanchang (China),

²¹² Métodos que tratan de reproducir la lógica del cerebro humano (de ahí su nombre) y que según Haikin (1998) presentan la característica de aprender del entorno y mejorar su rendimiento mediante este proceso de aprendizaje. Tienen gran capacidad de capturar y trabajar con relaciones complejas entre variables. Conforme Remus y O'Connor (2001) han demostrado un mejor resultado que otros métodos cuando se analizan series de datos mensuales o trimestrales (en vez de anuales).

²¹³ Métodos estadísticos – matemáticos importados de los análisis de predicción de datos económicos tales como inflación o tipos de interés. Para profundizar en sus bases son válidos los trabajos de Maddala y Lahiri (1992) y Wooldridge (2009); mientras que para analizar aplicaciones portuarias se encuentra una interesante aplicación en Gosasang *et al.* (2010) quienes realizan previsiones de tráfico en el puerto de Bangkok (Tailandia) utilizando este método.

²¹⁴ Tratado conceptualmente por Vladimir y Vapnik (1995) y utilizado con éxito en ambientes con pocos datos. Dicho método ha tenido, a la fecha, escasa relevancia en el campo portuario.

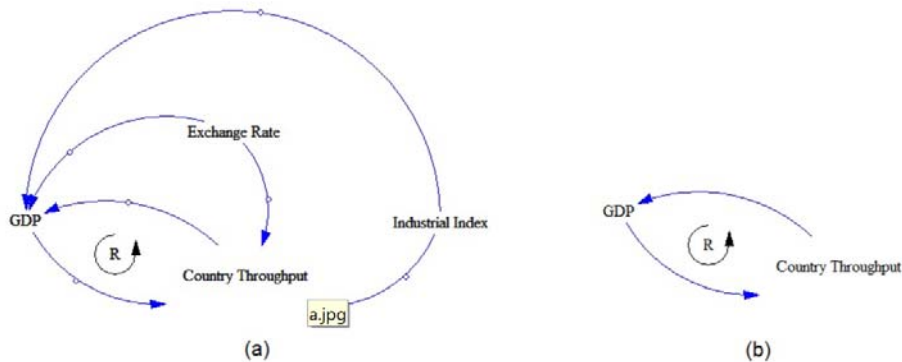
²¹⁵ Introducido por Deng (1982) para escenarios de previsión con gran incertidumbre y falta de datos tampoco ha sido, como en el caso anterior, un campo extendido en puertos o industria marítima.

profundamente la relación causal entre variables, detectando casos en los que la aparente relación entre variables no es causal sino “casual”. En estos casos, el análisis introduce errores de predicción cuando ambas variables se conectan estadísticamente. En otros ejemplos los errores se derivan de no analizar cuál es la naturaleza o razón real de esa relación causal (en el caso de que exista); introduciendo errores cuando las hipótesis sobre las que se asienta dicha relación cambia en el futuro (pero se usan en las previsiones).

Para construir su modelo SD, primero analizan desde un plano más básico y mediante una técnica de entrevistas con expertos qué variables de control o predicción pueden utilizarse para determinar el umbral de tráfico de contenedores de un país citando como variables más representativas el PIB (“*GDP*”) (ilustración 84), el tipo de interés monetario (“*exchange rate*”) y el índice de producción industrial (“*Industrial Index*”).

Elaboran un primer modelo causal en base a esto parámetros (figura “a” de la ilustración 84) llegando a la conclusión que para las localizaciones experimentales que han seleccionado (Suecia y China) es el primer parámetro (PIB) el que tiene significación estadística real²¹⁶ y simplificando el modelo utilizando este único parámetro en adelante (figura “b” de ilustración 84).

Ilustración 84. Diagrama de relación (“*causal loop*”) entre variables económicas y capacidad de manipulación de tráfico general (a) y simplificado (b) de un país.

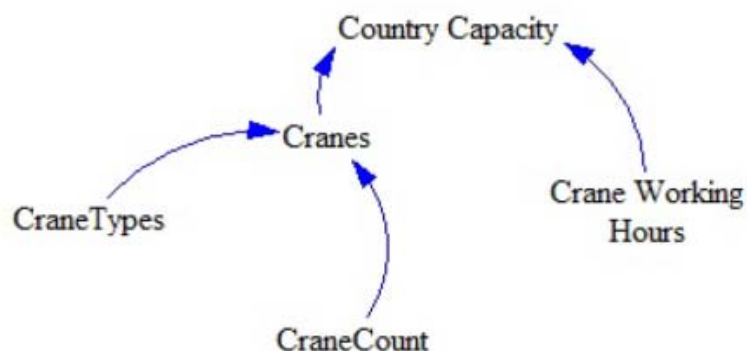


Fuente: Pawlas y Zall (2012).

A partir de aquí, establecen un algoritmo en el que relacionan la capacidad de movimiento de contenedores de un país a través de su equipamiento y concretamente del número y tipo de grúas de sus terminales y su disponibilidad de trabajo anual (en función del número de horas de trabajo). Dicho diagrama causal se muestra en la ilustración 85, mientras que el resultado final se analiza en la ilustración 86.

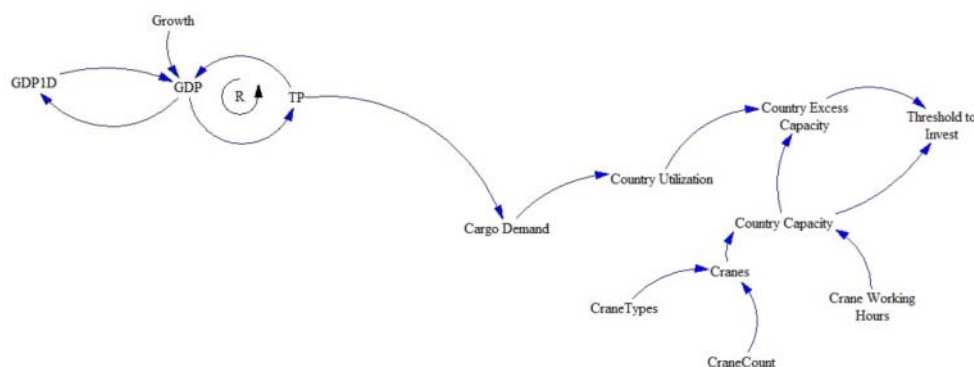
²¹⁶ Conforme estos autores Suecia presenta un índice de correlación de PIB / capacidad de tráfico de contenedores de 0,898 frente a 0,70 si se analiza el tipo de interés ó 0,43 si se compara al índice de producción industrial. En el caso de China estas correlaciones crecen hasta 0,960 en el caso del PIB y 0,875 en el caso de tipo de interés. En este último caso no se ha podido establecer la relación con el índice de producción industrial por falta de datos.

Ilustración 85. Modelo de capacidad portuaria basado en el número, tipo y horas de trabajo de las grúas de sus terminales.



Fuente: Pawlas y Zall (2012).

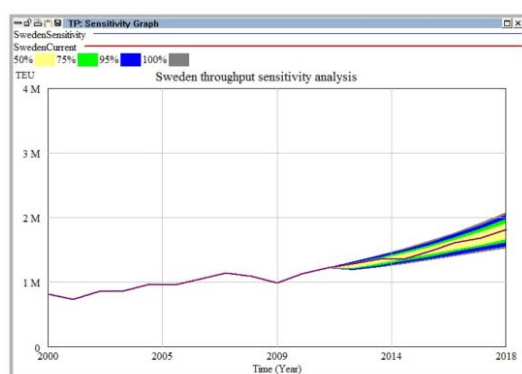
Ilustración 86. Diagrama de detalle del modelo de capacidad portuaria propuesto.



Fuente: Pawlas y Zall (2012).

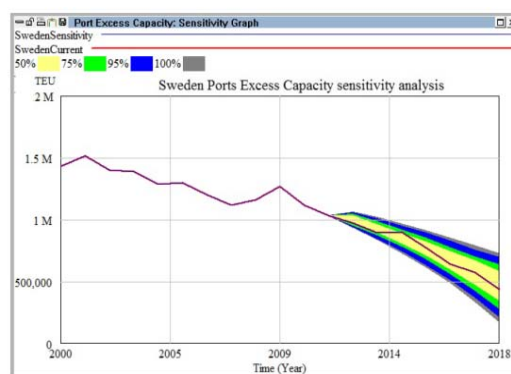
Tras un proceso de calibrado previo en el que los autores ajustan el modelo, presentan finalmente los resultados de sus investigaciones en dos parámetros: umbral o capacidad del sistema y excedente de capacidad de la terminal, con un horizonte de previsión de cinco años (hasta 2018) y con un análisis de sensibilidad incorporado (bandas al 50, 75, 95 y 100% de confianza). Un ejemplo de los resultados se presentan en la ilustración 87 a ilustración 90.

Ilustración 87. Capacidad de terminales de contenedores de Suecia.



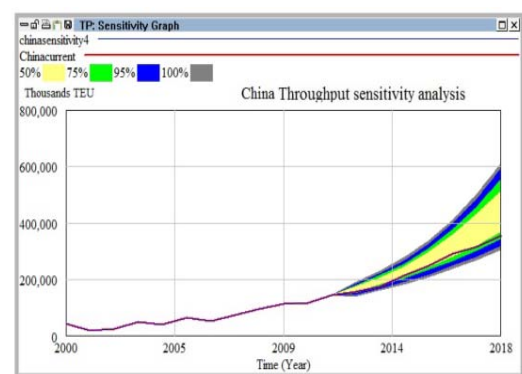
Fuente: Pawlas y Zall (2012).

Ilustración 88. Exceso de capacidad en puertos de contenedores de Suecia.



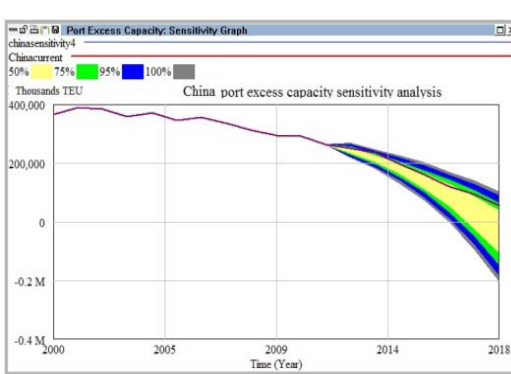
Fuente: Pawlas y Zall (2012).

Ilustración 89. Capacidad de terminales de contenedores de China.



Fuente: Pawlas y Zall (2012).

Ilustración 90. Exceso de capacidad en terminales de contenedores de China.



Fuente: Pawlas y Zall (2012).

No es sin embargo la primera aproximación que al campo de previsiones de tráfico se realiza en el contexto de sistemas dinámicos. Estos mismos autores ya citan a Ho *et al.* (2008), Carlucci y Cira (2009) y Ng y Lam (2011).

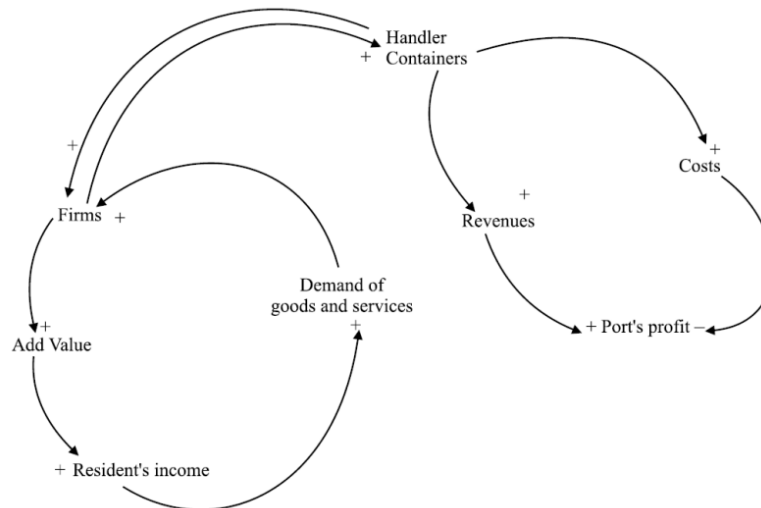
Ho *et al.* (2008) desarrollaron un modelo dinámico para la medición del rendimiento en el puerto de Hong Kong y determinar su capacidad a través de diferentes escenarios o políticas de expansión (el foco del estudio es fundamentalmente evaluar la eficacia de diferentes inversiones). Estos autores ya advierten sobre la conveniencia de utilizar sistemas SD (en detrimento de estadísticos clásicos) para tener en cuenta nuevos fenómenos o factores no presentes en la actualidad pero que se pueden presentar en el horizonte de simulación.

Carlucci y Cira (2009), en contraste con otros autores que suelen fijar su atención en grandes terminales, también usaron SD para modelar un puerto pero esta vez uno de pequeño tamaño como es el de Palermo (Italia). Sus investigaciones tenían un doble objetivo: medir la influencia del desarrollo portuario en la ciudad, sociedad y entramado económico con el que convive y un

segundo objetivo experimental que trataba de estudiar diferentes estrategias de inversión en infraestructuras y equipamiento portuario con el fin de poder atender la demanda futura prevista.

Para ello eligen un conjunto de variables con las que construir el modelo como son: la cantidad de contenedores que el puerto puede manipular (“*handler containers*”), los costes, ingresos y beneficios del puerto (respectivamente “*costs*”, “*revenues*” y “*Port’s profit*”), el número de empresas que operan en el puerto (“*firms*”) junto con el valor añadido que éstas producen (“*add value*”), la demanda de bienes y servicios que generan (“*demand of goods and services*”) o los ingresos de la población de su área de influencia (“*Resident’s income*”). Con todas estas variables construyen el modelo conceptual que se representa en la ilustración 91.

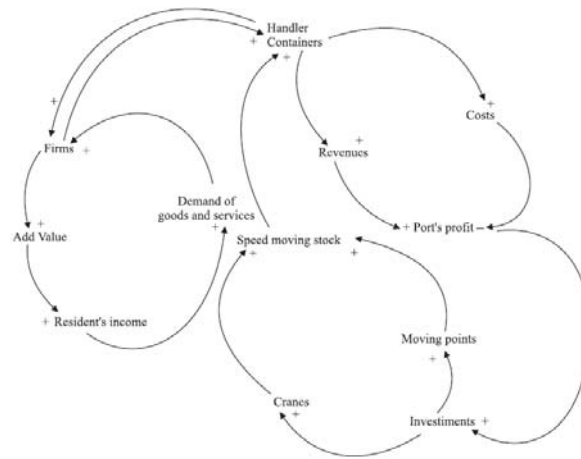
Ilustración 91. Relación entre variables macroeconómicas y económicos del puerto de Palermo (Italia).



Fuente: Carlucci y Sira (2009).

Estos autores tratan de evaluar diferentes escenarios de desarrollo que analizan a través de las inversiones realizadas en mejora del puerto (“*investments*”) tanto para incrementar el número de atraques (equivocadamente notada como “*moving points*” cuando en el texto se les refiere como “*mooring points*”) como en mejorar la productividad de grúas (“*cranes*”), aspectos ambos que afectan positivamente al rendimiento en el movimiento de contenedores (“*speed moving stocks*”) y con ello a la capacidad del puerto (“*handler containers*”). Todos estos conceptos se integran en el ciclo arriba definido y se representan en la ilustración 92.

Ilustración 92. Modelo SD propuesto para el puerto de Palermo (Italia).



Fuente: Carlucci y Sira (2009).

Ng y Lam (2011) introdujeron un sistema SD en el que tenían en consideración diferentes variables en el marco de la industria marítimo – portuaria (tamaño de flota, tamaño de los puertos, tamaño de los barcos, precio del mercado de fletes, perspectivas de achatarramiento de flota). Desarrollan un módulo específico para determinar el tamaño / capacidad de los puertos (que llamaran “*port growth limits*”) y para el que conforman los diagramas causales entre las inversiones a realizar y el volumen de tráfico movido por el mismo.

El modelo contempla tanto elementos positivos (el desarrollo de infraestructuras tiene efectos beneficiosos en el tráfico al servir de atractor aumentando las capacidades y disminuyendo los tiempos de operación) como negativos (los mayores costes portuarios por el desarrollo de inversiones que es necesario amortizar tienen un efecto negativo en los tráficos), proponiendo como otros autores curvas de tipo sigmoideo típicas de dinámicas de poblaciones para explicar el crecimiento de los umbrales con el tiempo. Estos autores también justifican el uso de sistemas SD en entornos portuarios frente a técnicas estadísticas o métodos econométricos por la complejidad del sistema y la existencia de relaciones claramente no lineales.

Wang *et al.* (2013a) centrado en la realización de previsiones de tráfico de contenedores mediante técnicas SD. El experimento lo aplican a dos países diferentes (Corea del Sur y Taiwan), de los cuales recogen datos del periodo 1990-2008 para calibrar el modelo y después proyectarlos hasta el año horizonte 2016.

Como objetivo secundario de este estudio tratan, además, de comparar los resultados de las previsiones de tráficos realizadas mediante simulación SD con las clásicas técnicas estadísticas de regresión lineal, aportación a nuestro entender, muy interesante.

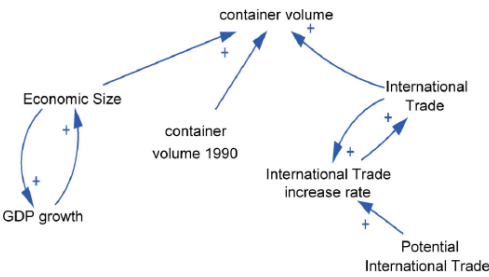
Para construir el modelo SD (utilizan el software *VenSim*®). Los autores primero describen que variables macroeconómicas o demográficas tienen mayor correlación con el tráfico de contenedores (citan un conjunto de investigaciones anteriores en el que se emplea el Producto Interior Bruto o “*GDP*”, producto nacional bruto o “*GNP*”, índices de producción industrial, población,...) concluyendo que el que presenta usualmente mayor grado de correlación es el PIB (“*GPD*”) que es el que utilizarán como soporte de su modelo causal.

Además, toman en consideración otras variables exógenas que han demostrado tener influencia en el tráfico de contenedores como son: el tipo de interés, cambios de políticas en países receptores, etc.; elementos que incluyen en el modelo mediante una función que denominan “*international trade factor*” (que se refleja en unidades de miles de TEU/año) y que es precisamente un algoritmo en el que tratan de englobar un conjunto de variables que afectan al volumen de tráfico de contenedores a nivel mundial y que definen mediante el modelo de difusión que había sido desarrollado por Bass (1969), quien a su vez toma como referencia curvas de crecimiento tipo sigmoideo en forma de “*S*” típicas en dinámica de poblaciones que se acaban de mencionar unos párrafos más arriba (crecimientos lentos inicialmente, acelerados en tramo central y nuevamente más suaves al final cuando el sistema está maduro).

Bajo estas bases construyen un modelo causal (ilustración 93); junto con los esquemas de flujos y stocks para el tráfico de contenedores y comercio internacional (ilustración 94 e ilustración 95).

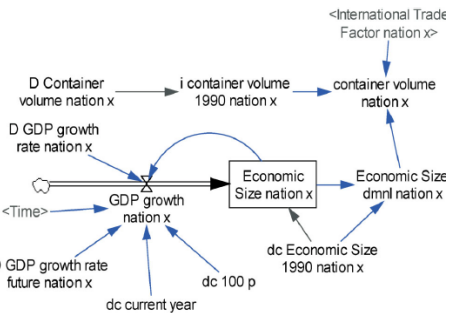
De igual modo llegan a conclusiones de cómo deben seleccionarse los datos para alimentar el modelo conforme el tráfico sea puramente *import/export* o de transbordo que resultan en modelos de evolución de tráficos típicamente diferentes (véase ilustración 96) y realizan las oportunas simulaciones para ambos países que se incluyen en la ilustración 97 (Taiwan) e ilustración 98 (Corea del Sur), destacando como, influenciado por las características de los países, en Taiwan toman un papel relevante los tráficos de transbordo (por lo que en la modelización consideran tanto éstos como los contenedores *import-export*), mientras que en Corea del Sur se puede ignorar al tráfico de transbordo y se opera directamente con tráficos *import-export*, pues ésta es en esencia su estructura de tráfico y modelo logístico - país.

Ilustración 93. Diagrama causal para la determinación del tráfico de contenedores.



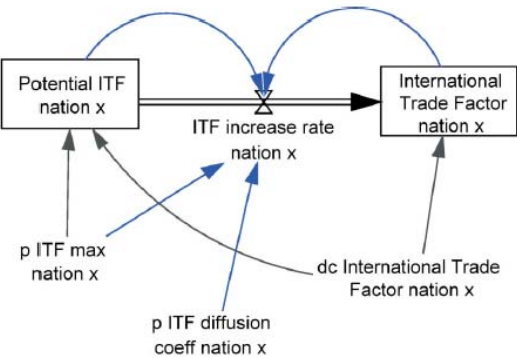
Fuente: Wang et al. (2013a).

Ilustración 94. Diagrama de flujos y stocks para el volumen de contenedores.



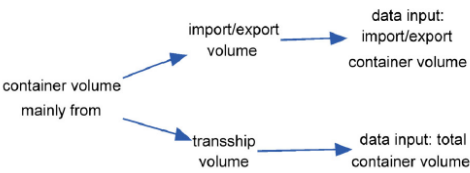
Fuente: Wang et al. (2013a).

Ilustración 95. Diagrama de flujos y stocks para el factor de comercio internacional.



Fuente: Wang et al. (2013a).

Ilustración 96. Método de selección de datos para alimentación de un modelo SD en puertos.



Fuente: Wang et al. (2013a).

Ilustración 97. Relación entre el tráfico de contenedores y la economía de Taiwan.

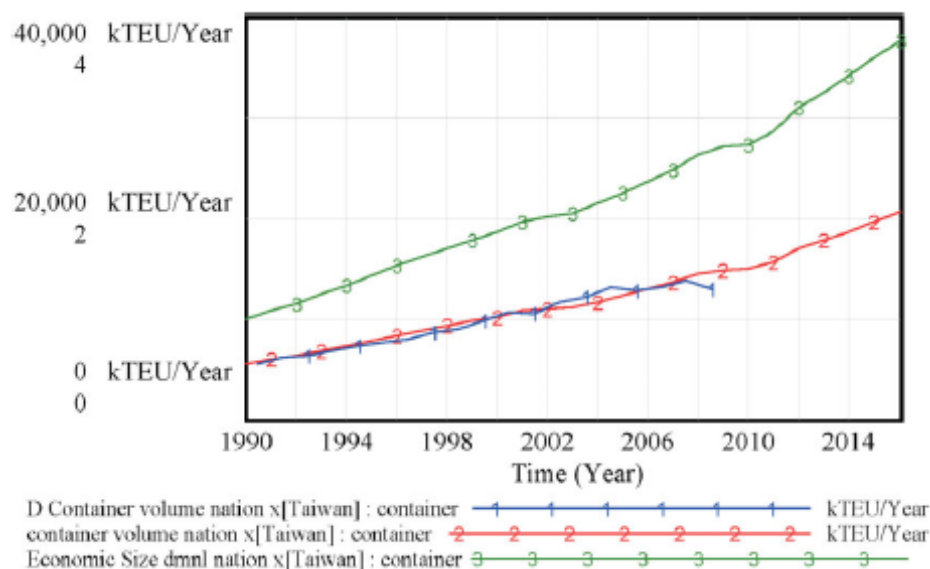
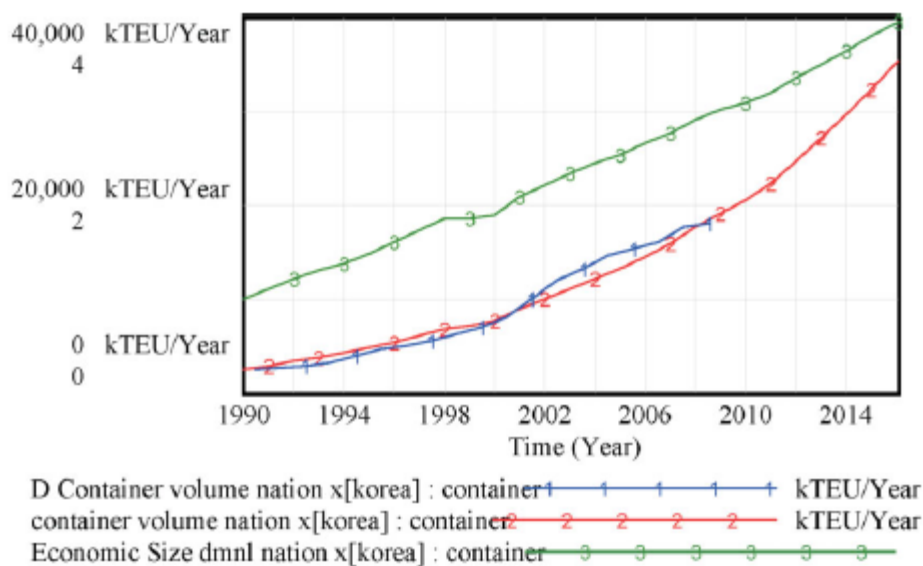
Fuente: Wang *et al.* (2013a).

Ilustración 98. Relación entre el tráfico de contenedores y la economía de Corea del Sur.

Fuente: Wang *et al.* (2013a).

Como segunda conclusión, los autores comparan los resultados en un contexto histórico con los que se habrían obtenido mediante técnicas de regresión lineal llegando a la conclusión de que el

método de simulación mediante SD aporta unos mejores resultados que este procedimiento estadístico, fundamentalmente porque en este último no se toman en consideración factores exógenos (solo opera con datos históricos) mientras que con SD estas variables si se tienen en cuenta y por lo tanto es capaz de anticipar efectos futuros que las técnicas estadísticas directas no son capaces de internalizar.

3.4.1.3 Industria marítima, fletes y astilleros utilizando modelización SD.

Modelos SD han sido utilizados en el apartado de la industria marítima y análisis de costes de fletes (“*shipping industry*”) de una manera muy pionera por Wijnolst (1975) y más tarde Munitic *et al.* (2003d, 2003e y 2003f); y, a finales de la primera década de los 2000, por Dikos *et al.* (2006); Randers y Göluke (2007) y Engelen *et al.* (2009). En la última década destacarían Lam y Yap (2011) y Handini y Uchida (2013).

Por orden cronológico primero debe citarse a Wijnolst (1975). Este estudio es, sin duda, pionero en la aplicación de modelos SD a la industria marítimo-portuaria; si bien ha tenido poca repercusión o influencia en estudios posteriores de planificación portuaria. Este investigador realizó un modelo SD para determinar los efectos inducidos en la economía de países en vías de desarrollo (y en sus objetivos nacionales), y en el desarrollo de una flota nacional propia de buques (buques de bandera de dicho país).

Dentro de la escuela croata pero con un enfoque ligeramente diferente al utilizado por otras investigaciones destacan Munitic *et al.* (2003d, 2003e y 2003f) que presentan sus investigaciones SD aplicadas a los procesos de organización de trabajos en un astillero en los que ya habían venido trabajando durante el periodo 1990-1995 y que fueron objeto de publicaciones previas en Munitic *et al.* (1990) y Munitic y Šimundić (2000). En estos primeros trabajos los autores codificaron un modelo en la versión avanzada del lenguaje de simulación *Dynamo* y lo implantaban también en un ordenador personal mediante el lenguaje de simulación denominado *SYSDYNS* desarrollado por el propio Munitic.

Dikos *et al.* (2006) codifican un modelo SD para intentar explicar el comportamiento del mercado de fletes y lo aplican a un segmento concreto como es el de buques tanqueros.

Randers y Göluke (2007) lograron explicar mediante sistemas SD uno de los elementos más estudiados en el mundo científico relacionado con este campo y que tiene que ver con la evolución del mercado (coste) de fletes y variables como son el tamaño de la flota y el grado de ocupación de la misma (para ello analizan el comportamiento de dicho mercado entre el año 1950 y la fecha de publicación).

Engelen *et al.* (2009) vuelven a analizar el mercado de fletes pero en este caso bajo la perspectiva del comportamiento y arbitraje en función de distintos segmentos o tipos de buques (Handy, Panamax y Capsize).

Dentro de este “saco” de estudios orientados a la industria marítima (más que a la planificación portuaria individualizada) se encuentra Lam y Yap (2011) quienes interpretan los puertos como eslabones dentro de una cadena global de suministro y examinan la dinámica y patrones por los cuales las líneas de contenedores hacen escala en diferentes puertos; estudiando por tanto el concepto que definen como “conectividad inter-portuaria” y que aplican a un sistema experimental práctico compuesto por los puertos de Shanghai (China)²¹⁷, Busan (Corea del Sur)²¹⁸, Kaohsiung (Taiwan)²¹⁹ y Ningbo (China)²²⁰ en el este de Asia. En el estudio se analiza bajo esta perspectiva de red, la capacidad necesaria de transporte marítimo y las rutas óptimas para satisfacer la demanda de transporte en esta área geográfica.

En función de los datos reales utilizados, los autores demuestran como mucho de los barcos utilizan este conjunto de puertos bajo una pauta secuencial y proponen que una oferta o paquete comercial común ofrecido por un operador global capaz de operar en este conjunto de terminales podrían capitalizar oportunidades y redundar en una optimización del conjunto.

Handini y Uchida (2013) presentan un artículo muy especializado en el que mediante un modelo SD, tratan de optimizar la operación de un buque, minimizando sus costes (en concreto los relacionadas con el mantenimiento de uno de sus elementos específicos) en un escenario en el que las tareas de reparación o mantenimiento preventivo sólo se pueden desarrollar en un puerto específico y por lo tanto introduce una fuerte restricción en relación a su disponibilidad.

3.4.1.4 Análisis de riesgos y planes de contingencia utilizando modelización SD.

Relativamente más recientes (a partir del año 2010) son los estudios de riesgos e interrupción de servicio por eventos inesperados o catastróficos (tales como ataques terroristas, bloqueos de puertos por huelgas, desastres naturales, etc...).

Quizás los primeros (o al menos la primera referencia que se ha encontrado) en utilizar este enfoque SD con el objetivo de cuantificar riesgos, evaluar políticas de seguridad y medir los

²¹⁷ Primer puerto del mundo por volumen de contenedores movido en 2015, con unos movimientos totales de 36.5 millones de TEU's (35.2 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²¹⁸ Sexto puerto del mundo por volumen de contenedores movido en 2015, con unos movimientos totales de 19.5 millones de TEU's (18.7 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²¹⁹ Decimotercer puerto del mundo por volumen de contenedores movido en 2015, con unos movimientos totales de 10.3 millones de TEU's (10.6 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²²⁰ Cuarto puerto del mundo por volumen de contenedores movido en 2015, con unos movimientos totales de 20.6 millones de TEU's (19.5 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

efectos de interrupción del servicio en el campo portuario fueron Saranen y Hilmola (2010) a los que siguieron Lattila y Saranen (2011) y Croope y McNeil (2011).

Saranen y Hilmola (2010) en un estudio de situaciones de emergencia en el transporte intermodal en el Golfo de Finlandia también aplican metodología SD. Estos autores ponen de relieve que a pesar de la importancia que el puerto tienen en la economía y que a través de los mismos se mueve el 75% de las mercancías que entran y salen de Finlandia (siendo por tanto los puertos un elemento esencial para el suministro del país y su economía), no existe un estudio que permita analizar alternativas en caso de situaciones de emergencia o cambios repentinos e inesperados de condiciones. Tratan, por tanto, de identificar los riesgos en las rutas actuales evaluando la funcionalidad del sistema de transporte bajo una perspectiva SD.

Categorizan los tráficos según sus riesgos (abarcando no sólo el modo marítimo sino, por citar algún ejemplo por su relevancia y riesgos asociados, los movimientos ferroviarios asociados a transportes de graneles líquidos desde Rusia) y tipo de operadores (ponen énfasis en como las grandes compañías de transporte internacional son capaces de reestructurar sus rutas y reorientar su negocio en caso de emergencia o interrupción prolongada de servicio en el área sometido a estudio, algo que no podrían hacer las empresas locales que se verían abocadas al cierre).

En este contexto analizan escenarios alternativos en la cadena de suministro como la construcción de un túnel entre Tallin (Estonia) y Helsinki (Finlandia) que si bien aparentemente no es justificable financieramente podría encontrar sentido si se toman en consideración en un análisis de sensibilidad posibles efectos como huelgas en instalaciones portuarias; costes de reparación en el caso de accidentes marítimos; o, riesgos asociados a la concentración de tráficos en los puertos con la vulnerabilidad que esto produce.

Llegan a conclusiones sobre enrutamientos alternativos según tráficos (movimientos ferroviarios supliendo movimientos portuarios) y políticas de seguridad de suministro (stocks mínimos de mercancías críticas cuyo restablecimiento no sería inmediato).

Lattila y Saranen (2011) continúan los estudios de estos autores y realizan una nueva aplicación práctica de evaluación de riesgos en el transporte intermodal finés, mientras que Croope y McNeil (2011) centran sus investigaciones en determinar la resiliencia post-desastre de un sistema de transporte.

El término resiliencia utilizado por estos autores y, posteriormente, por Omer *et al.* (2012) en el mismo contexto marítimo- portuario se refiere al análisis del tiempo que el sistema vuelve a recuperar la normalidad o los umbrales de productividad pre-evento tras la aparición de un suceso inesperado que produce una interrupción o alteración significativa del servicio. Se definen dos

atributos que afectan a la resiliencia como son la “*vulnerabilidad*” del sistema y la “*capacidad de adaptación*” del mismo²²¹.

Esta aproximación es usada por Croope y McNeil (2011) y por Omer *et al.* (2012); quienes simulan mediante SD diferentes sistemas portuarios evaluando los efectos negativos e impactos de fenómenos de interrupción de servicios, así como los costes que estos introducen.

Yeo *et al.* (2013) también investigan los impactos que pueden producirse en los volúmenes de tráfico atendidos en una terminal por efecto del incremento de los niveles de seguridad en la misma; aspecto que aplican de manera práctica en diseños experimentales a los que someten terminales coreanas. Analizando las variables que afectan al proceso e integrándolas en un modelo SD, concluyen qué efectos se infieren en términos de coste y eficiencia portuaria.

En síntesis resaltan que un incremento y complicación de los controles a los que son sometidos los contenedores lleva a una aumento de los tiempos de despacho (para poder permitir llevar a cabo dichos controles) y a una pérdida de competitividad del puerto y con ello una reducción del número de barcos que recalán en el mismo.

Como curiosidad estiman que con la adopción de ciertas políticas de seguridad los puertos coreanos perderían en el entorno de 2,7 millones de TEU's en el año 2015 y por encima de 3,0 millones en el 2020; poniendo desde el punto de vista conceptual el balance seguridad *versus* volumen e instando a realizar un análisis cuantitativo del coste real en términos de competitividad derivado de la adopción de según qué políticas o estrategias de seguridad.

3.4.1.5 Análisis de impacto de los puertos y/o su relación con su hinterland utilizando modelización SD.

Otros estudios referidos por Oztanriseven *et al.* (2014) y que no podrían incluirse específicamente en los apartados anteriores sino más bien en el análisis de impacto económico de los puertos en su área de influencia serían los de Schade y Schade (2005); Fiorello *et al.* (2010), Fu (2011a) y Videira *et al.* (2012).

Schade y Schade (2005) realizaron un complejo desarrollo que en realidad incluían cinco sub-modelos (transporte, modelo macroeconómico, economía regional, políticas y medioambiente) que agregaron en un modelo conjunto bajo el nombre *ESCOT*. Los autores analizaban distintos escenarios y políticas de desarrollo del sistema de transporte alemán (incluyendo puertos, carreteras, ferrocarriles, aeropuertos, vías navegables, etc.) para analizar sus efectos con el

²²¹ Los términos de “*resiliency*”; “*vulnerability*” y “*adaptive capacity*” habían sido definidos con carácter general (no para el caso portuario sino para cualquier sistema) por Dalziel y McManus (2004) y utilizados en ámbitos portuarios, como se comentado, por Croope y McNeil (2011) y Omer *et al.* (2012).

objetivo de seleccionar un sistema de transportes sostenible y estudiar sus impactos en la economía nacional y regional.

Por su parte Fiorello *et al.* (2010) continúan los trabajos de los autores anteriores utilizando un modelo construido sobre *VenSim®* que denominan *ASTRA* y que aplican a escala europea; analizando la red de transportes con todos sus elementos y los escenarios de inversión propuestos, las capacidades resultantes y sus efectos en la economía. El modelo permite establecer las relaciones entre la demanda de tráfico, variables económicas, la flota de vehículos y barcos y sus efectos ambientales, permitiendo una valoración multicriterio de diversas políticas.

Un enfoque macroeconómico es utilizado por Fu (2011a) quien entra a analizar mediante sistemas SD la relación entre diferentes variables macroeconómicas y los puertos construyendo un sistema puerto-economía donde se establecen las relaciones causales entre uno y otro y se determinan los flujos dinámicos que la enmarcan. El autor utiliza un caso experimental para validar el modelo.

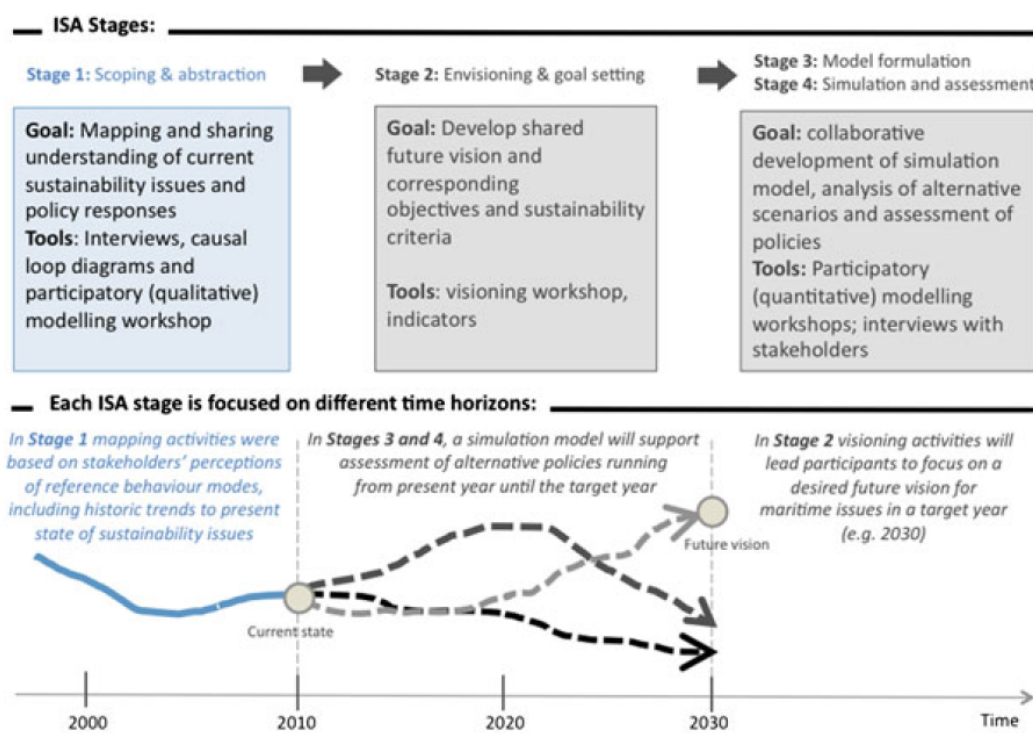
Videira *et al.* (2012), siguen las más puras bases conceptuales de J.W. Forrester en sus publicaciones “*Urban Dynamics*” (Forrester, 1961) y “*World Dynamics*” (Forrester, 1971) y de Meadows *et al.* (1972) en su clásico “*Limits to Growth*”. Estos autores presentan un interesante trabajo que trata de demostrar la conveniencia de: i) coordinación entre los diferentes actores que actúan en la red de transportes (incluidos los gestores portuarios y grupos clave de decisión en la esfera política y administrativa); y, ii) la conveniencia de su participación en las fases de planificación para obtener los mejores resultados conjuntos (búsqueda y potenciación de sinergias) en una metodología de trabajo que definen como de valoración integrada de sostenibilidad y denominan bajo el acrónimo “ISA” (del inglés “*Integrated Sustainability Assessment*”)²²².

Comienzan el estudio con una serie de entrevistas a 37 entidades o grupos de interés públicas y privadas del sistema portuario portugués (espacio experimental que utilizan en sus investigaciones) evaluando de una manera cualitativa las políticas portuarias puestas en marcha y describiendo el “estado del sistema” en el año 2010 (fase 1 del estudio) y el estado deseado por estos “actores” con interés y conocimiento en el sistema en el año 2030 (fase 2 del estudio). Mediante el conocimiento adquirido en las entrevistas los autores componen un modelo SD en los que evalúan cualitativamente las políticas propuestas y comparan con el estado deseado en el año horizonte (fases 3 y 4 del estudio).

²²² Término que ya había sido utilizado por Videira *et al.* (2010) pero introducido por Weaver y Rotmans (2006) y más desarrollado en Weaver y Jordan (2008) en el marco de técnicas para la implementación de evaluaciones de impacto ambiental (“*environmental impact assessment*” o “EIA”) y de evaluación ambiental estratégica (“*strategic environmental assessment*” o “SEA”) promovidos por la Unión Europea. Estos primeros autores habían realizado estudios previos similares en conexión con investigaciones sobre el parque natural de la Ría de Formosa (Videira *et al.*, 2003) y la cuenca del Guadiana (Videira *et al.*, 2009).

A continuación (ilustración 99) se puede observar la metodología “ISA” propuesta por estos autores, tal y como la presentan en su artículo.

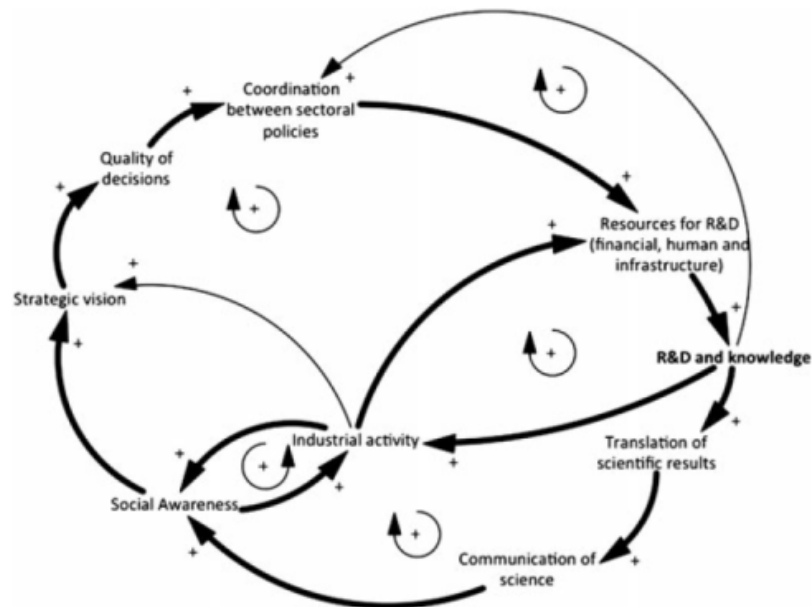
Ilustración 99. Metodología “ISA” de valoración integrada de sostenibilidad.



Fuente: Videira *et al.*(2012).

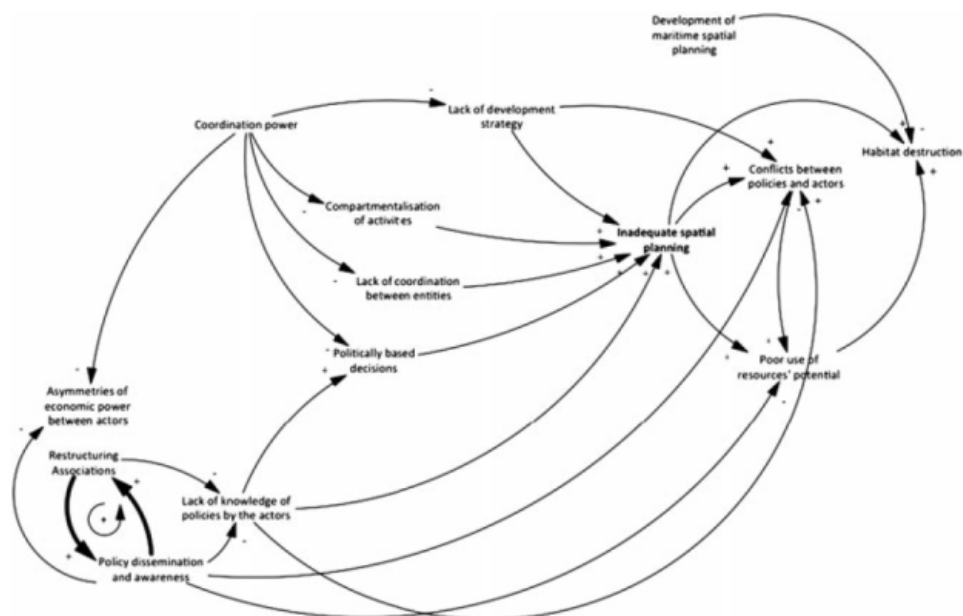
Estos autores presentan los diferentes diagramas causales confeccionados para la implementación de su modelo que, como se puede observar, tienen un marcado enfoque ambientalista y están claramente inspirados en los primeros estudios de Forrester y Meadows y los trabajos encargados para el club de Roma (ilustración 100 a ilustración 104).

Ilustración 100. Diagrama causal de aspectos relacionados con investigación y desarrollo y dispersión de actividades en relación a asuntos relativos al “océano”.



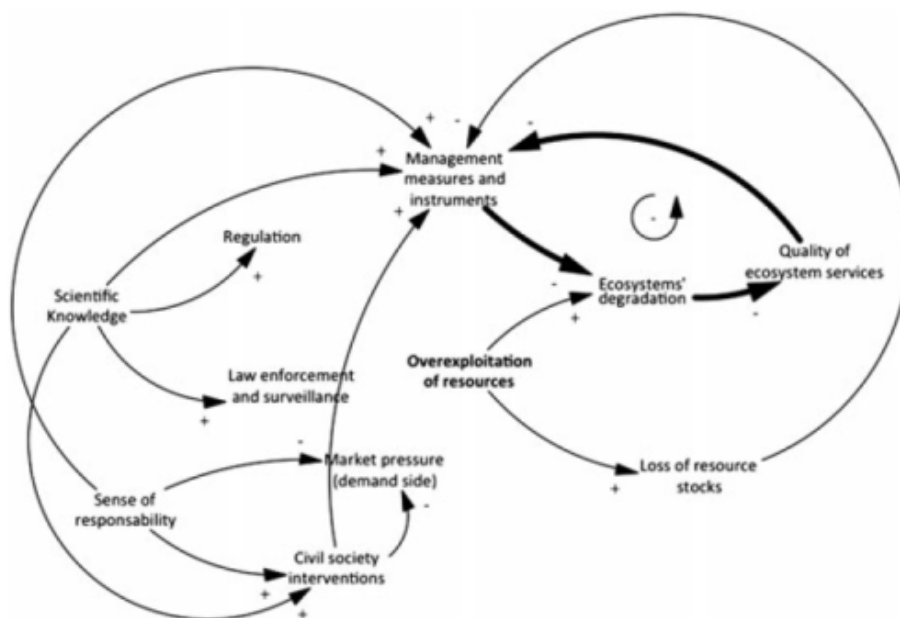
Fuente: Videira et al.(2012).

Ilustración 101. Diagrama causal en relación a aspectos de planificación espacial de espacios costeros.



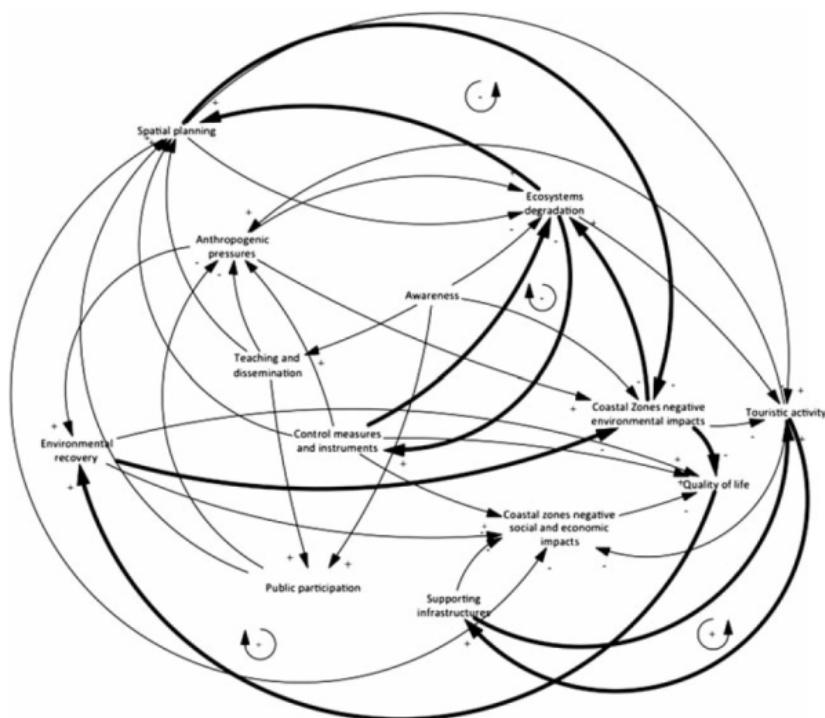
Fuente: Videira *et al.*(2012).

Ilustración 102. Diagrama causal en relación a los problemas relacionados con la sobreexplotación de recursos costeros.



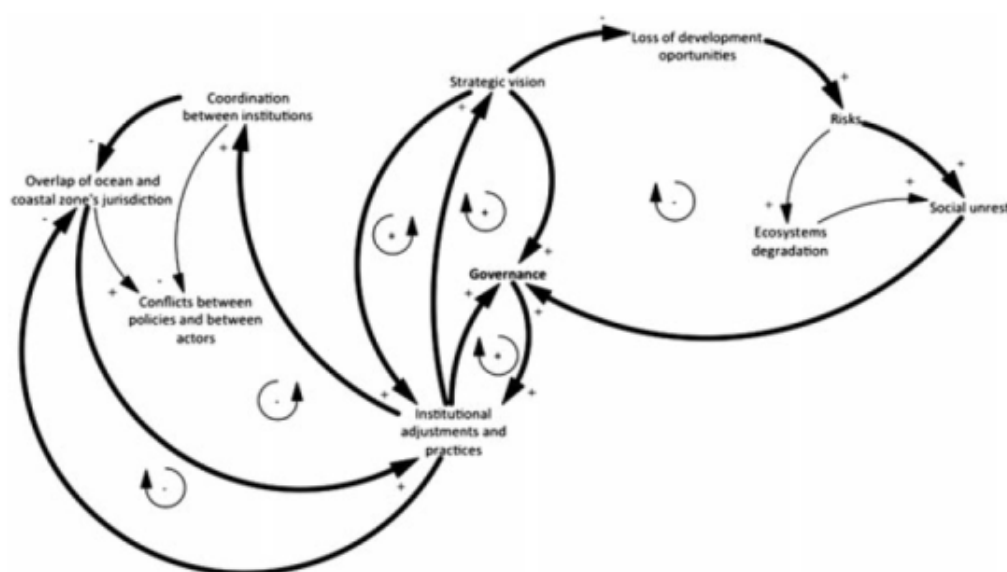
Fuente: Videira *et al.*(2012).

Ilustración 103. Diagrama causal de aspectos relacionados con los impactos en espacios costeros.



Fuente: Videira *et al.*(2012).

Ilustración 104. Diagrama causal de aspectos relacionados con la gobernanza y ordenación de asuntos marítimos.



Fuente: Videira *et al.*(2012).

No citado por Oztanriseven *et al.* (2014) pero dentro de este grupo se podría también resaltar el trabajo de modelización SD que Pinhal dos Santos (2012) aplica en el Puerto de Lisboa (Portugal) estudiando la relación entre el desarrollo portuario y variables macroeconómicas como el empleo regional, su balanza comercial y el PIB.

Más allá de los estudios que acaban de citarse y que, salvo el último, son recogidos por Oztanriseven *et al.* (2014), en la investigación que se ha desarrollado en el marco de esta tesis, se han localizado otras interesantes aplicaciones, centradas mayoritariamente en las relaciones que se establecen entre las ciudades y los puertos y englobadas en lo que en el apartado de introducción se ha definido como “*escuela asiática*”.

En este campo se pueden citar a Han (2006); Cui (2007); Yang (2007); Cao (2009); Zhao (2009); Liu *et al.* (2010); Zhang (2010); Wang (2010); Xiaodong *et al.* (2010); Fu (2011a y 2011b); Dai (2012); Xing (2012); Gao (2012); Yang (2012); Li y Wang (2012); Wang *et al.* (2013a); y, finalmente, Yu *et al.* (2014).

Todos estos autores encuentran un campo de investigación apropiado por el crecimiento exacerbado que ha experimentado China en los últimos años con el consiguiente incremento de

sus exportaciones y las grandes tensiones introducidas en su sistema portuario y con ello en el medio ambiente, así como en las ciudades y regiones en que se han desarrollado sus obras de expansión.

Aunque como ya se ha citado este tema ha sido objeto de una explosión científica en China, la primera referencia bibliográfica que se ha encontrado en este campo específico es la de Sebo (1995); que se quiere destacar tanto por la conceptualización del problema, como por la presentación de resultados y diversidad de variables que toma en consideración su modelo.

Sebo (1995) mediante un enfoque SD trata de analizar el desarrollo de las redes intermodales asociadas al puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) estableciendo las relaciones entre cada uno de las partes interesadas y analizando los intereses (no siempre coincidentes sino claramente incompatibles) entre todas ellas.

Mediante su modelo estudia con profundidad efectos de segundo orden (“*second order effects*”) en los planes de desarrollo y analiza críticamente las hipótesis implícitas y ocultas en la toma de decisiones (que denomina “*hidden assumptions*”).

Para ello, este investigador desarrolla con mucho detalle los diagramas causales en los que se establecen las relaciones entre distintos aspectos. Dichos diagramas se representan desde la ilustración 105 y hasta la ilustración 111. La primera corresponde a un esquema de alto nivel en el que se muestran los factores que influyen en el desarrollo de infraestructuras intermodales (no sólo para el puerto sometido a estudio sino en general) y que trata de ser, según el propio autor, una introducción comprensiva al transporte intermodal.

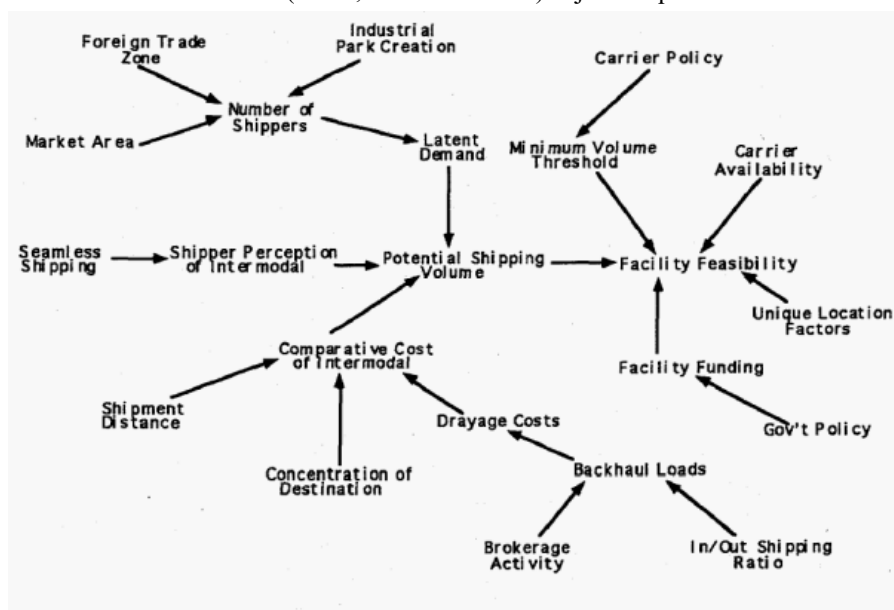
Después de éste, le siguen un conjunto de esquemas para explicar el modelo intermodal del puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) y los factores que le afectan, así como unos sub-modelos de costes, flujos de mercancías, impacto económico, aspectos medioambientales y sistemas de información.

Como se puede ver en los diagramas, quizá el aspecto más destacable de este trabajo (más allá de la manera comprensiva en la que desarrollan todos los diagramas que acaban de enunciarse) es el gran conjunto de variables que toma en consideración y que dan idea de la conveniencia de utilizar sistemas SD para este tipo de análisis con alto grado de abstracción.

A través del modelo, el autor subraya lo que resultan ser los puntos críticos en el sistema analizado (los llama “*leverage points*”). Estos aspectos corresponden a las áreas en las que cambios sistemáticos pueden resultar más fácilmente afectados o que tienen mayor influencia en el comportamiento del sistema y que afectan a aspectos tan variados como: 1) la falta disponibilidad de contenedores vacíos en Lewiston con los que conteneirizar ciertos productos que hoy se transportan no contenedorizados; 2) altos costes de distribución de las mercancías en la región e

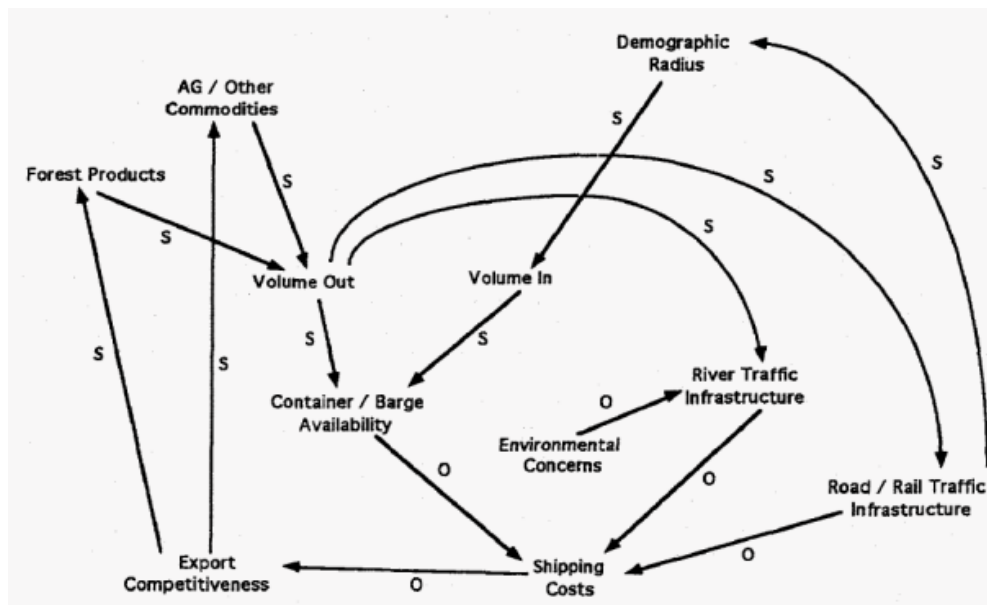
imposibilidad de establecer sinergias para evitar viajes vacíos por la preponderancia de mercancías de importación; 3) ciertas deficiencias en los procesos de intercambio de información; y, 4) dificultad (y a su vez necesidad) de realizar acciones de desarrollo de infraestructuras en localizaciones concretas del puerto.

Ilustración 105. Diagrama de disponibilidad de instalaciones intermodales en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.



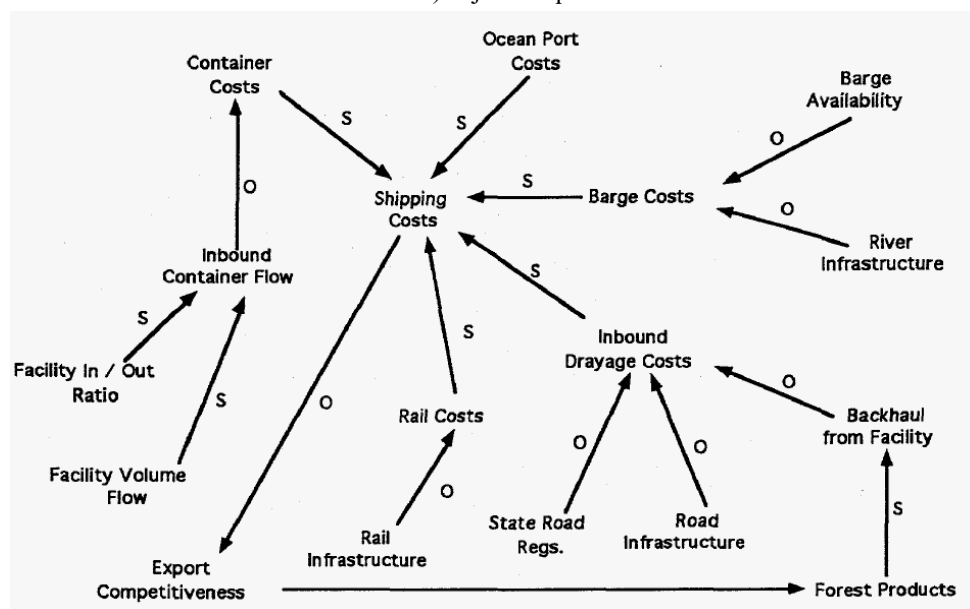
Fuente: Sebo (1995).

Ilustración 106. Diagrama relativo al Sistema Portuario en el puerto puero de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.



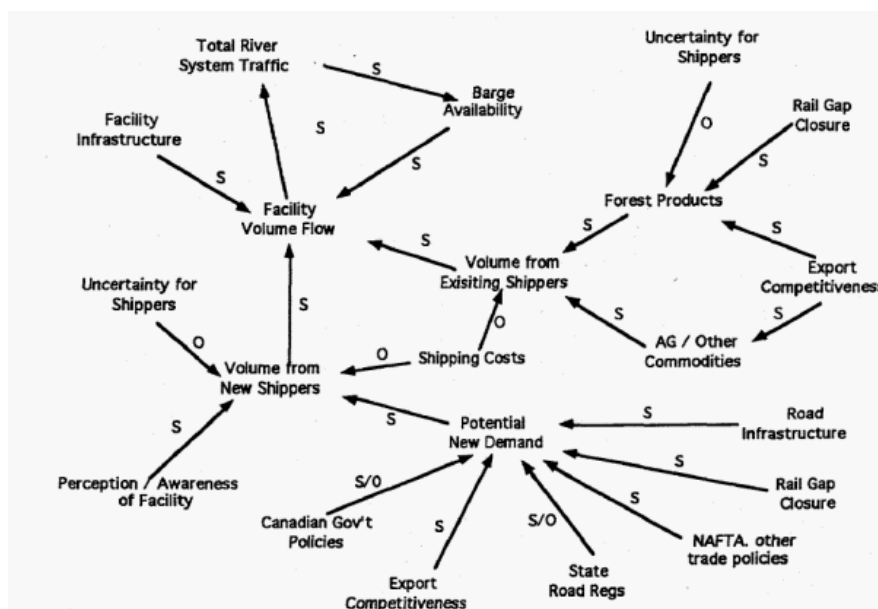
Fuente: Sebo (1995).

Ilustración 107. Diagrama relativo al Modelo de Costes en el puerto puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.



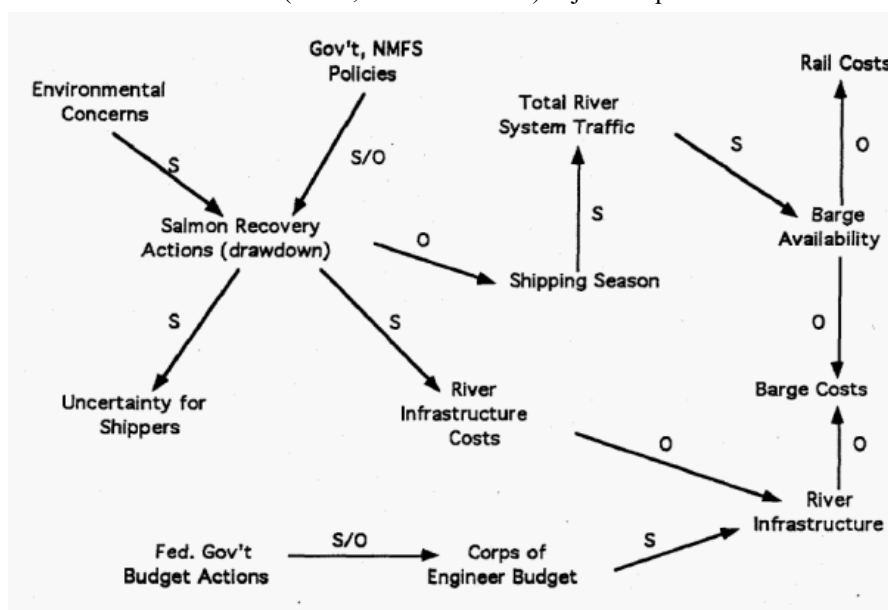
Fuente: Sebo (1995).

Ilustración 108. Diagrama relativo a Flujo de Mercancías en el puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.



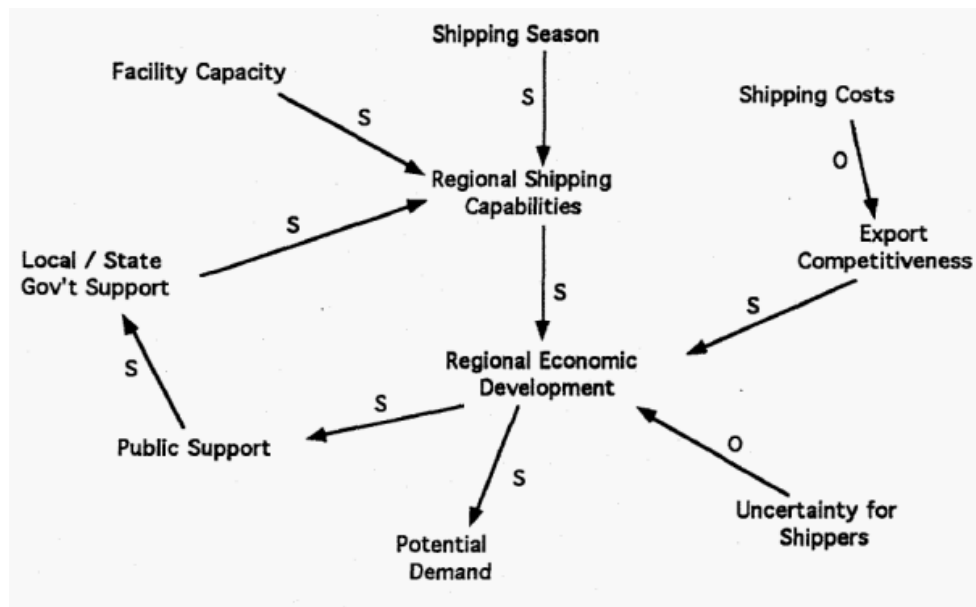
Fuente: Sebo (1995).

Ilustración 109. Diagrama relativo a la evaluación de Impactos Ambientales en el puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.



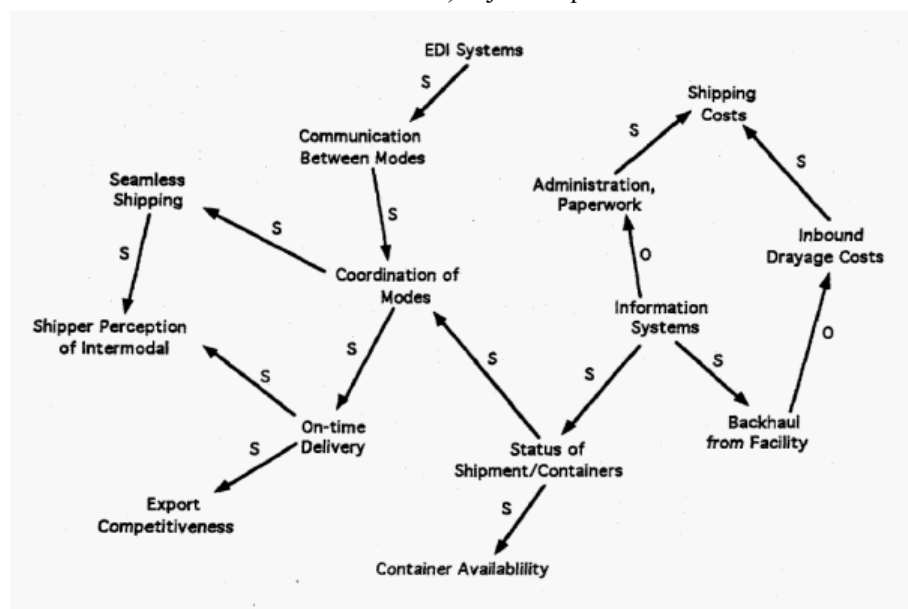
Fuente: Sebo (1995).

Ilustración 110. Diagrama relativo a Impacto Económico Regional en el puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.



Fuente: Sebo (1995).

Ilustración 111. Diagrama relativo a Sistemas de Información en el puerto de Lewiston (Idaho, Estados Unidos) bajo enfoque SD.



Fuente: Sebo (1995).

Retomando la escuela asiática y comenzando por orden cronológico, Han (2006) realiza un estudio de las externalidades introducidas en entornos portuarios con foco en efectos tales como

la contaminación inducida por las actividades portuarias (emisiones), congestión portuaria, destrucción de hábitats,... Todos estos efectos son puestos en relación con los efectos positivos que se generan, demostrando la relación que existe entre las decisiones tomadas y los resultados obtenidos en uno y otro caso (efectos positivos o negativos), proponiéndose como una útil herramienta con la que ayudar a la toma de decisiones en el marco de un desarrollo sostenible y resultando quizá el primer estudio que incorpora SD al análisis de externalidades en puertos de una forma tan explícita. El modelo (desarrollado con el software *VenSim* ®) se aplica para determinar la evolución prevista en el puerto de Qingdao²²³ (Shandong, China) bajo ciertos escenarios en el marco temporal 2006-2020.

Cui (2007) analiza políticas de competencia y cooperación en los puertos situados en la desembocadura del río Yangtze (China) bajo un enfoque SD donde el sistema portuario sometido a análisis está conformado por diversos puertos individuales.

Este autor determina que: i) dada la rápida evolución y la compleja dinámica de las instalaciones portuarias; ii) la necesidad de realizar proyecciones de largo plazo; y, iii) el amplio conjunto de variables interactúan; el enfoque más acertado desde una perspectiva multicriterio es precisamente el de SD.

Este autor también utiliza el software *VenSim* ® en su análisis y llega a conclusiones prácticas sobre desarrollo futuro como son el grado de especialización que sería adecuado. En este contexto recomienda que el puerto de Shanghai (China) focalizara sus esfuerzos en la exportación de contenedores, el de Ningbo (China) en graneles y el de Taicang (China) en transbordos. Asimismo, mediante los ejercicios de simulación realizados, llega a la conclusión de la necesidad de desarrollar otros puertos en zonas próximas (puertos en la zona del río Changjiang) para relajar la presión que en la actualidad se ejerce sobre el entorno el puerto de Shanghai (China).

La importancia de la función de los puertos en la economía nacional y regional es también investigada por Yang (2007) bajo un enfoque SD. Desde un plano conceptual, el autor comienza por analizar el tipo y alcance de las actividades portuarias, que más tarde aplicará de una manera “macro” al conjunto de puertos que conforman el sistema portuario chino. Concluye que, de alguna manera, la economía china está “orientada” hacia sus puertos como elementos clave de su economía. Haciendo *zoom*, el autor estudia la influencia de los puertos en la provincia de Jiangsu²²⁴, generando escenarios alternativos en cuanto a las inversiones a realizar, ajustes en la estructura industrial y adaptación y mejora de equipamiento portuario. Este autor estima el

²²³ Quinto puerto por importancia de China y séptimo puerto del mundo por movimiento de mercancías con 17.5 millones de TEU's en 2015 (16.6 millones de TEU's en 2013). Fuente: World Shipping Council (2017).

²²⁴ Situados en el río Yangtze y operados por la Autoridad Portuaria de Suzhou en esta región se encuentran los puertos fluviales de Zhangjiagang, Changshu y Taicang que en su conjunto movieron 479 millones de toneladas en el año 2014 (siendo sus tráficos principales: carbón, mineral de hierro, acero, cemento,...). Véase Wikipedia POS (2016).

impacto final en la economía regional; poniendo sobre la mesa diversas sugerencias para el desarrollo futuro tanto de la región como del puerto.

Este enfoque medioambientalista en el uso de SD en puertos no es exclusivo de la escuela china. Así, Madachy *et al.* (2008), tratan de evaluar bajo este prisma el tráfico de mercancías proveniente de China y con destino al sur de California (Estados Unidos), con el objetivo de evaluar posibles medidas de reducción de la huella de carbono que afectarían tanto al propio diseño de las rutas como a la colaboración entre agentes o tecnologías utilizadas por las compañías navieras, transitarías o de transporte terrestre.

Cao (2009) centra su análisis en el impacto económico inferido por la construcción de terminales de carbón en China en el marco de la fuerte presión que está introduciendo las crecientes necesidades de importación de este material para soportar el crecimiento del gigante asiático. Como dato factual, aborda las tensiones que se produjeron en el año 2008 como consecuencia del desabastecimiento y cuellos de botella que se pusieron de manifiesto en el sistema y que llevaron a las autoridades a acelerar sus planes de expansión en este mercado concreto. Un modelo SD se aplica para determinar el impacto económico del programa de desarrollo en las tres principales regiones chinas poniendo de relieve como la garantía de suministro de carbón alcanza dimensiones de “seguridad nacional” y un verdadero cuello de botella para el desarrollo económico del país. El autor discretiza el modelo en tres subsistemas: producción, transporte y consumo de carbón. El modelo trata de determinar las rutas óptimas y necesidades de infraestructuras para atender la demanda, determinando cuantitativamente las relaciones entre los umbrales de actividad portuaria y el impacto económico regional.

Zhao (2009) trata de analizar el desarrollo portuario bajo un balance global de los efectos que produce en el desarrollo urbano. Sin negar los efectos positivos de las actividades portuarias, éstas se ponen en contrapunto con los fenómenos de ocupación de la línea de costa, la contaminación inducida por sus actividades y la posible alteración del equilibrio ecológico de la zona donde se asientan. El enfoque es, por tanto, el de restar a los efectos positivos producidos por el puerto, las externalidades que este genera, de tal manera que se consiga una “*contribución verde*” del puerto a la ciudad. El modelo SD desarrollado lo aplican al puerto de Dalian²²⁵ (China) con horizonte de simulación hasta el 2020.

Liu *et al.* (2010) siguen avanzando en el estudio analítico de “ciudades portuarias” bajo aproximaciones SD. Sus estudios son más en términos de los efectos que induce el puerto en el entorno (como consumidor de recursos o introductor de efectos ambientales) que del propio análisis de las operaciones portuarias, aceptando los propios autores que su enfoque está basado en un “*concepto verde*” que no ocultan ni en el propio título del artículo y que ya venía siendo

²²⁵ Puerto por el que anualmente transitan entorno a 100 millones de toneladas y que en el año 2015 ocupó el 15º puesto en el mundo en términos de movimientos de contenedores con 9.5 millones de TEU's. (10.1 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

tratado por autores anteriores como Han (2006); quien empieza a analizar de una manera cuantitativa mediante modelización SD las externalidades que producen los puertos, y Zhao (2009) que utiliza la misma terminología de “*puerto verde*”.

Consideran dos aspectos relevantes del medio. El primero el desarrollo económico (aspectos positivo que miden en forma de la contribución del puerto al PIB de su zona de influencia) y, el segundo, el consumo de recursos o la contaminación inducida (estos dos últimos, aspectos negativos que evalúan por ejemplo en los insumos de agua o consumos energéticos de las industrias relacionadas con el puerto) y lo aplican como caso experimental concreto al puerto de Shangai (China).

Los autores desarrollan para este puerto escenarios interactivos que simulan hasta el año 2020 y en los que consideran conjuntamente medidas de restructuración industrial, realización de inversiones portuarias, ahorros energéticos y reducción de emisiones. Determinan, finalmente, como los sistemas SD pueden ser una herramienta eficaz para la toma de decisiones evaluando de una manera global las consecuencias ambientales de las decisiones tomadas como palanca para proporcionar un desarrollo sostenible. El modelo conceptual utilizado por estos autores para reflejar las interacciones entre puerto y su entono / ciudad se representa en la ilustración 112, que es claramente autoexplicativa de la complejidad del modelo construido por estos autores.

Zhang (2010)²²⁶ sigue estudios anteriores basados en el concepto de “*puerto verde*” que ayuden a un desarrollo sostenible, centrando esta vez su investigación en el Puerto de Shangai (China) y evaluando los efectos negativos que, entre otros, tienen el consumo de recursos no renovables, ocupación de línea de costa, ocupación de espacios en tierra, o la contaminación inducida por las actividades portuarias. Establecen, por tanto, un modelo de evaluación conjunta del desarrollo de las ciudades y su economía con sus puertos y el medio ambiente. El modelo se calibra con datos reales del periodo 1997-2006 para después extrapolarlos en un horizonte de simulación de largo plazo.

²²⁶ La fecha de publicación de esta referencia es 2010, si bien probablemente los estudios sean anteriores (2007) por los escenarios temporales que utiliza para calibración (1997-2006) y posterior simulación (2007 en adelante).

Este es quizá el autor que más ampliamente trata este tema explicando la necesidad de establecer sinergias en dos niveles que llama políticas de integración vertical y políticas de coordinación horizontales.

Para ello se apoya en un modelo SD y en la teoría macroeconómica con los que trata de objetivar y cuantificar sus conclusiones que aplica al sistema portuario compuesto por Guangzhou²²⁷, Shenzhen²²⁸ y Hong Kong²²⁹ y, cuyo comportamiento proyecta hasta el año 2020 (una vez convenientemente calibrado con datos históricos).

Xiaodong *et al.* (2010), sobre la base conceptual de que el desarrollo de un puerto es una condición necesaria para el desarrollo de una economía local pero que a su vez las actividades portuarias introducen impactos en el entorno; estudian también el sistema conjunto formado por la ciudad y el puerto bajo la perspectiva metodológica de SD y una aproximación “ambientalista” o de desarrollo sostenible. Para ello considerarán variables de promoción económica local/regional junto con las externalidades derivadas del consumo de recursos o de los efectos de la contaminación producida; modelo que aplican a un ambiente concreto como es el puerto de Shanghai (China)²³⁰. En su modelo consideran escenarios alternativos en cuanto a reestructuración industrial, políticas alternativas de expansión/inversión y medidas de ahorro energético y reducción de emisiones. Determinan cuantitativamente los resultados que se obtienen y defienden la aplicación de esa metodología como elemento fundamental de decisión.

Luan *et al.* (2010) con la ayuda también del software *VenSim*® y centrado en el caso del Puerto de Dalian (China)²³¹, también, trabajan en el campo de la ciudad portuaria analizando la interacción y relación entre el puerto y su área de influencia. Estos autores, tras concluir la evidente relación entre el tamaño y capacidad de los puertos y la vocación exportadora de su hinterland, advierten acerca de la sobrecapacidad actual del sistema y la necesidad de decelerar los planes de desarrollo. También llegan a una interesante conclusión en el sentido de que, en términos absolutos, el desarrollo portuario ha incidido en un crecimiento de la economía de su “ciudad portuaria” (ilustración 115) pero, sin embargo, la contribución de los puertos a la economía de su hinterland en términos porcentuales está en proceso regresivo (ilustración 116). Esto se debe, según sus resultados analíticos, a que la demanda de instalaciones portuarias se ve

²²⁷ Octavo puerto del mundo por volumen de contenedores, en el año 2015, con unos movimientos totales de 17.2 millones de TEU's en 2015 (16.2 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²²⁸ Tercer puerto del mundo por volumen de contenedores en el año 2015, con unos movimientos totales de 24.0 millones de TEU's en 2015 (24.0 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²²⁹ Quinto puerto del mundo por volumen de contenedores en el año 2015, con unos movimientos totales de 22.2 millones de TEU's en 2015 (22.2 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

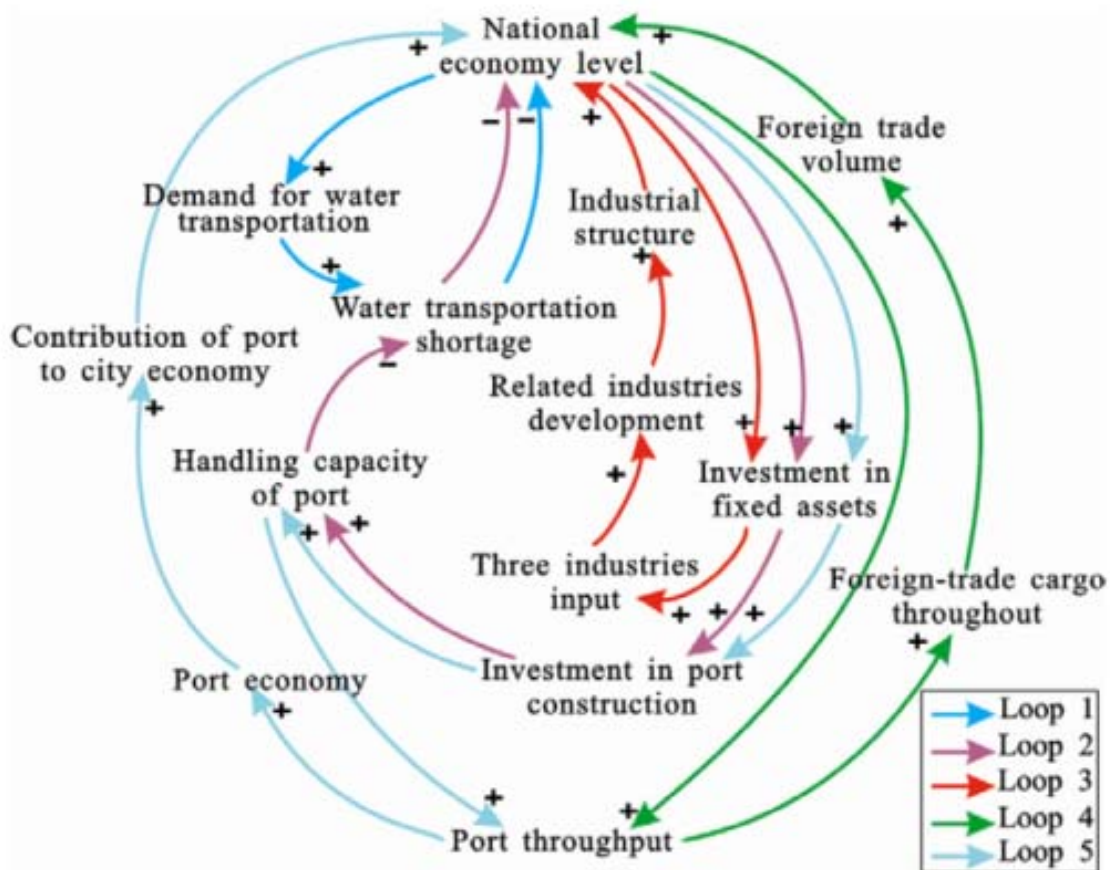
²³⁰ Primer puerto del mundo por volumen de contenedores en el año 2015, con unos movimientos totales de 36.5 millones de TEU's en 2015 (35.2 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²³¹ Decimoquinto puerto del mundo por volumen de contenedores, con unos movimientos totales de 9.5 millones de TEU's en 2015 (10.1 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

fundamentalmente influenciada por el desarrollo de una industria primaria o secundaria en la zona en el que se asienta el puerto pero que; a medida que crece la importancia del sector terciario (no tan demandante de necesidades logístico-portuarias), esta demanda o necesidades portuarias decrecen porcentualmente.

Estos autores construyen un diagrama causal (ilustración 113) con un total de cinco bucles (unos positivos y otros negativos) que reflejan con posterioridad en un complejo modelo SD en el que se sintetizan su visión de un sistema puerto-ciudad y que es el que utilizan en su ejercicio de simulación (ilustración 114) y que corren tras un proceso de calibración con datos reales.

Ilustración 113. Diagrama causal y definición de bucles (*causal loop*) en un modelo SD.



Fuente: de Luan *et al.* (2010).

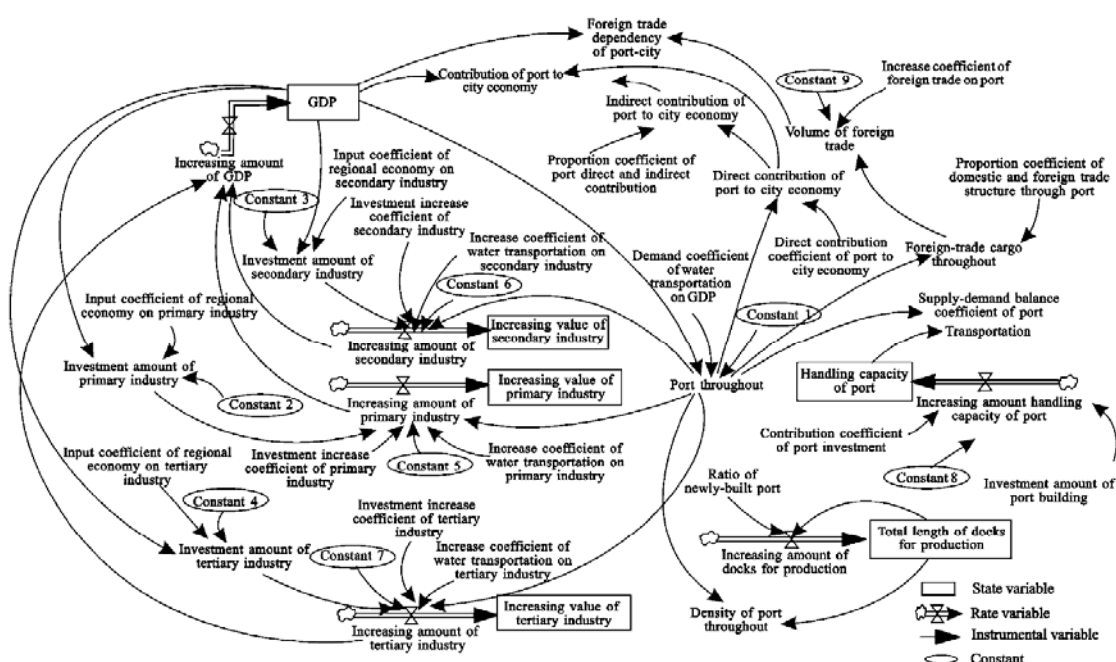
Ilustración 114. Sistema Dinámico puerto – ciudad según Luan *et al.* (2010).Fuente: Luan *et al.* (2010).

Ilustración 115. Contribución absoluta (directa e indirecta) del puerto en la economía de su ciudad.

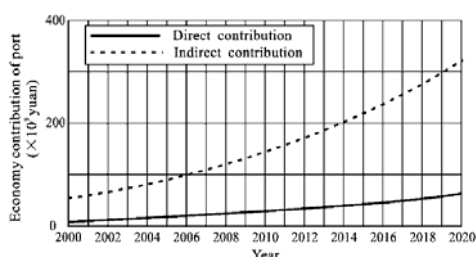
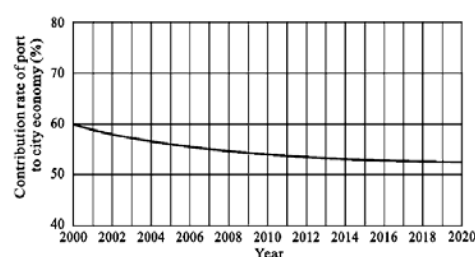
Fuente: Luan *et al.* (2010).

Ilustración 116. Simulación de la contribución porcentual del puerto en la economía de su ciudad.

Fuente: Luan *et al.* (2010).

Fu (2011a) centra su zona de experimentación en el puerto de Shenzhen²³² (Guangdong, China) y trata de establecer las relaciones entre la economía regional y dicho puerto en un ambiente de simulación SD infiriendo como la economía regional influye en la evolución del puerto y, al revés, como los beneficios generados por el desarrollo portuario afectan a la economía regional. Este autor centra sus esfuerzos en describir los patrones de estructura territorial del sistema como elemento clave del modelo y, tras el análisis de estos factores internos, en el establecimiento de

²³² Shenzhen, situado en la desembocadura del río Perla en China, es el tercer puerto del mundo por volumen de contenedores en el año 2015, con unos movimientos totales de 24.0 millones de TEU's en 2015 (24.0 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

las relaciones de causalidad en un conjunto de cuatro subsistemas o relaciones: economía-portuaria, cadena de transporte y distribución - puerto, sociedad – puerto e inversiones – puerto.

Dai (2012) vuelve al tema que ya había sido tratado por Cui (2007) y Wang (2010), analizando sistemas portuarios desde una perspectiva macro a través de su hinterland y en relación a políticas de cooperación y coordinación con otros puertos y muy influenciado por el debate abierto en China tras el super-desarrollo de sus puertos y la fiera competencia entre distintas terminales. Estos autores superan el concepto de ciudad portuaria (“*port city*”) para adentrarse en el de región portuaria (“*port-hinterland city*”) determinando un modelo conceptual de relaciones entre diversos elementos de la economía regional y la actividad portuaria. En el modelo desarrollado se establecen mecanismos de reparto de tráfico entre puertos basados en el tiempo como variable de decisión. Desde el punto de vista práctico estudia los puertos en la desembocadura del río Perla (China)²³³ calibrando el modelo con datos del periodo 1998-2009 para después hacer una proyección para el periodo 2010-2015. Bajo sus estudios concluye que los puertos de Hong Kong (China) y Shenzhen (China) tendrían mejores resultados conjuntos si actuaran de una manera coordinada trabajando como un verdadero “grupo de puertos”.

Xing (2012), en un ejercicio crítico de cómo se venían realizando los análisis de impacto económico y social en China en relación a otros países, establece en un primer paso un modelo teórico basado en una selección de variables que tienen que ser consideradas en el análisis (utiliza para ello la teoría clásica de matrices *input-output* y un método Delphi para seleccionar los elementos más relevantes en el caso de análisis de la industria portuaria) para una vez obtenido los resultados de estas relaciones *input-output*, modelizar escenarios mediante técnicas SD. Utiliza el modelo para analizar las bondades de tres escenarios alternativos de desarrollo en el puerto de Tianjin²³⁴ (China).

Gao (2012) advierte en su artículo que debido a un periodo de super-desarrollo portuario en China, se han puesto de manifiesto, recientemente, algunos efectos ocultos perniciosos entre los que destaca la sobreexplotación de determinadas infraestructuras y el riesgo de una irracional competencia inter-portuaria que derivan en algunos casos en el mal uso de recursos portuarios y a la construcción de infraestructuras no necesarias alejadas de objetivos de desarrollo sostenible que la sociedad actual demanda. Pone como ejemplo los puertos chinos de Dalian²³⁵, Yingkou²³⁶,

²³³ En la desembocadura del río Perla (Pearl River) se sitúa una mega-melópolis donde están presentes varios de los más importantes puertos de China como son los de Hong-Kong, Shenshen o Guangzhou; respectivamente los puertos 3º, 6º y 8º del mundo por movimiento de contenedores en 2015. (Entre estos tres puertos totalizaron en este año 61.5 millones de TEUS en el año 2015). Fuente: World Shipping Council (2017).

²³⁴ Décimo puerto del mundo por volumen de contenedores, con unos movimientos totales de 14.1 millones de TEU's en 2015 (14.1 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²³⁵ Decimoquinto puerto del mundo por volumen de contenedores, con unos movimientos totales de 9.5 millones de TEU's en 2015 (10.1 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

²³⁶ Vigésimo cuarto puerto del mundo por volumen de contenedores, con unos movimientos totales de 6.0 millones de TEU's en 2015 (5.7 millones de TEU's en 2014). Fuente: World Shipping Council (2017).

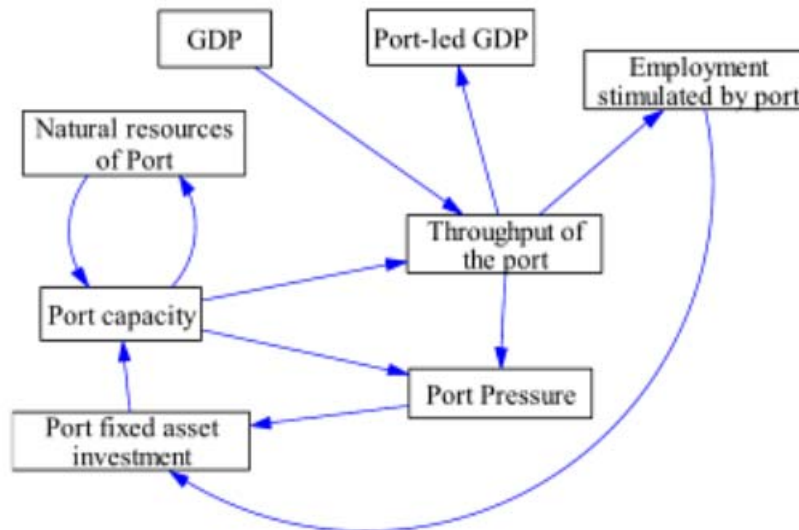
Dandong²³⁷ y Jinzhou⁶⁴ donde existen instalaciones infrautilizadas y una exacerbada política de bajos precios. En este contexto, continua explicando el autor, el Gobierno regional de Liaoning quiere poner en marcha un programa de racionalización que optimice los recursos disponibles y evite que estos efectos se produzcan en un futuro. Así, los responsables del puerto de Dalian, alineados con esta estrategia regional de optimización, desarrollan un modelo SD para evaluar las futuras políticas de expansión pero en consideración conjunta con los otros puertos y no atendiendo a un análisis aislado de las instalaciones que directamente gestionan. Para ello comienzan por analizar la repercusión y relación entre el puerto y la economía regional con un ámbito geográfico amplio y que interesa a un hinterland en el que los otros puertos también tienen un “*papel relevante*” en el modelo.

Li y Wang (2012) examinan los efectos dinámicos de los puertos en la economía local / urbana de la zona donde están asentados, nuevamente combinando tecnología SD con modelos econométricos tipo *input-output* y lo aplican a un caso concreto del puerto de Zhuhai (China). Simulan un caso base y un escenario de desarrollo alternativo, tratando de pronosticar el impacto de estas políticas en el largo plazo (2025), como apoyo a la decisión de los gestores portuarios. Para ello utilizan *VenSim*® como software de apoyo (en su versión educacional).

Los autores definen en un primer paso un diagrama muy sencillo en el que tratan de determinar la contribución del puerto a la ciudad (denominada “*port-led GPD*” en la ilustración 117) y el nivel de empleo que genera (“*employment simulated by port*”). Para ello establecen como una determinada decisión de inversión (“*port fixed asset invesment*” en dicha ilustración) afecta a la capacidad del puerto (“*port capacity*”) incrementando los umbrales de movimiento de mercancías (“*throughput of the port*”), umbral que a su vez viene afectado por la evolución de la economía local medido a través de la evolución del PIB (“*GPD*”). El aumento de la capacidad del puerto induce además una presión en su entorno (“*port pressure*”) y una variación de los recursos naturales (“*natural resources of port*”) que son también elementos considerados en el modelo y que producen ciertos bucles con respecto a la propia capacidad del puerto y las inversiones a realizar.

²³⁷ Zhuhai, Dandong y Jinzhou son puertos de segundo orden dentro del sistema portuario chino, si se comparan con otras megadársenas de este país pero registraron en el año 2013 unos nada despreciables movimientos de más de 100 millones de toneladas en los dos primeros casos y 85 millones de toneladas en el tercero.

Ilustración 117. Interrelación de la influencia de puerto en la economía local. Diagrama explicativo bajo SD.



Fuente: Li y Wang (2012).

Yu *et al.* (2014) investigan la influencia de los puertos en la ciudad y en concreto como los sistemas de transporte terrestre asociados a los puertos (carretera y ferrocarril) pueden determinar la competitividad del puerto y afectar a la economía urbana. Para ello los autores diferencian tres niveles o subsistemas: economía, redes de transporte e inversiones en transporte y analizan sus relaciones concluyendo como diferentes combinaciones de inversión producen unos u otros efectos. Como ejemplo experimental los autores eligen la ciudad de Tianjin (China).

3.4.1.6 Otros criterios de clasificación de modelos SD en puertos.

Más allá de esta primera clasificación funcional de modelos SD en ambientes marítimos-portuarios en razón del objetivo final del estudio, Oztanriseven *et al.* (2014) presentan un interesante análisis y clasificación de los distintos trabajos analizados en función de determinadas variables como son: 1) región en la que se centran los estudios (puertos de Asia, Norte-América, Europa,...); 2) tipo de puerto (marítimo o fluvial); 3) consideración, o no, de efectos intermodales (análisis o no de otros modos de transporte); 4) variables analizadas en la formulación de relaciones causales del modelo (eficiencia portuaria, inversiones / expansión necesarias, nivel de seguridad, tiempos de espera de buques, capacidad total del puerto,...); 5) tipos de variable analizadas (endógenas o propias del puerto como costes portuarios, capacidad de los elementos de manipulación, etc... o exógenas o inducidas en el puerto como demanda total de tráfico, precio de los fletes o mercancías, perfil de llegada de buques,...); y, 6) análisis de sensibilidad y tipos de escenarios analizados en el modelo (estudios de interrupción de servicio, análisis de capacidad, etc...).

De entre éstas, quizá la más interesante a los efectos cubiertos por la presente tesis doctoral, es la tabla que proporcionan en relación a la aproximación metodológica a las técnicas SD de los diferentes autores analizados y qué clase de relaciones causales son consideradas por ellos en la formulación del modelo.

Esquematizan estos autores siete diferentes categorías y señalan que las variables más frecuentemente utilizadas son las que tienen que ver con la productividad y disponibilidad de recursos, las inversiones necesarias y los umbrales de capacidad del puerto. En la tabla 15 y su continuación en la tabla 16 se presentan las variables utilizadas por distintos investigadores.

Estos autores, realizan también una clasificación de los modelos en función de tres características básicas:

- Integración con otros sistemas o modelos: Conexión, o no, del subsistema portuario con otros subsistemas, indicando con qué tipo de subsistema se relaciona el modelo SD.
- Horizonte y tiempo de paso de simulación (horas – días; meses; años), y por último,
- Lo que los autores denominan retos del modelo y podrían redefinirse como dificultades intrínsecas del mismo en lo que se refiere: i) bien a los propios datos (su adquisición, precisión o necesidad de transformación), ii) bien los que se refieren a la propia complejidad del modelo (tamaño, heterogeneidad, número de variables,...).

Los resultados de esta clasificación se muestran compilados en la tabla 17.

Tabla 15. Variables de relación causal utilizadas por diferentes autores.

Relación Causal	Variable	Fuente / Autor
Variables relacionadas con el Puerto / Terminal	Niveles de Seguridad	Yeo <i>et al.</i> (2013)
	“Atractividad” del puerto	Yeo <i>et al.</i> (2013) Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Competencia / Competición	Li y Wang (2012)
	Fiabilidad del Puerto	Yeo <i>et al.</i> (2013)
	Expansión	Ho <i>et al.</i> (2008)
	Eficiencia	Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Carga / Tráfico	Mingming (2011)
Variables temporales	Tiempo de Servicio	Koseler (2008)
	Tiempo de carga / descarga (contenedores)	Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Tiempo de despacho de buques	Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Tiempo de espera de buques	Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Tiempo de transporte	Koseler (2008)
	Tiempo para el atraque	Koseler (2008)
Flujo de flota / Fletes	Umbral de capacidad (Contenedores, Flota)	Yeo <i>et al.</i> (2013) Cheng <i>et al.</i> (2010) Ho <i>et al.</i> (2008) Li Y Wang (2012)
	Volumen exportado	Koseler (2008) Silva <i>et al.</i> (2011)
Procesos de Transbordo	Movimiento de Recursos (Grúas)	Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Llegada de barcos	Dvornik <i>et al.</i> (2006) Munitic <i>et al.</i> (2003b) Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Ocupación de Atraque	Dvornik <i>et al.</i> (2006) Munitic <i>et al.</i> (2003b) Cheng <i>et al.</i> (2010)

Relación Causal	Variable	Fuente / Autor
	Velocidad (carga/descarga, transporte, despacho, camiones/vagones)	Dvornik <i>et al.</i> (2006) Munitic <i>et al.</i> (2003b)
Capacidad portuaria y utilización de capacidad	Capacidad / Productividad de los recursos (Puerto/Terminal, Grúa, Atraque, Mano Obra, Barco)	Cheng <i>et al.</i> (2010) Li Y Wang (2012) Wijnolst (1975) Mingming (2011) Koseler (2008)
	Disponibilidad de Recursos (Atraque, Almacenamiento, Recursos Humanos, Terminal, Recursos tecnológicos, Grúas, Camiones)	Dvornik <i>et al.</i> (2006) Munitic <i>et al.</i> (2003b) Wijnolst (1975) Koseler (2008)
	Utilización de la flota (real)	Randers y Göluke (2007)
	Utilización de la flota (deseada)	Randers y Göluke (2007)
	Capacidad deseada (construcción de barcos)	Wijnolst (1975)
Monetarias / Económicas	Costes de paso de mercancía	Yeo <i>et al.</i> (2013)
	Costes de Operación	Cheng <i>et al.</i> (2010)
	Costes Logísticos de Industrias de Exportación	Silva <i>et al.</i> (2011)
	Costes de Fletes	Randers y Göluke (2007)
	Inversión (Terminal / Puerto, Capacidad de astillero)	Cheng <i>et al.</i> (2010) Li Y Wang (2012) Wijnolst (1975) Mingming (2011)
	Comercio Exterior (Exportación, Importación)	Wijnolst (1975) Mingming (2011) Lattila (2008)

Relación Causal	Variable	Fuente / Autor
	Beneficios / Resultados de transporte marítimo	Silva <i>et al.</i> (2011)
	Contribución Económica del Puerto (PIB, empleos)	Li Y Wang (2012) Mingming (2011)
	Tipo de Cambio	Lattila (2008)
	Inflación	Lattila (2008)
Interrupción del servicio	Posibilidad de Incidentes de Seguridad	Yeo <i>et al.</i> (2013)
	Congestión (Puerto, Superficie de Almacenamiento, Atraque)	Cheng <i>et al.</i> (2010) Ho <i>et al.</i> (2008)

Fuente: Oztanriseven *et al.* (2014) y elaboración propia.

Tabla 16. Variables de relación causal utilizadas por diferentes autores.

Tipo Variable	Variable Utilizada	Fuente / Autor
Variables Endógenas	Umbral generado domésticamente	Ho <i>et al.</i> (2008)
	Tiempo y coste de viaje	Fiorello <i>et al.</i> (2010)
	Oferta	Dikos <i>et al.</i> (2006) Engelen <i>et al.</i> (2006)
	Inventario de Contenedores	Koseler (2008)
	Capacidad (Grúa, Buques)	Koseler (2008)
	Flujo de contenedores vacíos	Koseler (2008)
	Capacidad carga/descarga grúas	Koseler (2008)
	Productividad portuaria	Koseler (2008)
Variables Exógenas	Capacidad contenedores	Dalziell y McManus (2004)
	Umbral movimientos generado por determinada región	Ho <i>et al.</i> (2008)
	Llegada de buques	Dvornik <i>et al.</i> (2006)
	Demanda	Dikos <i>et al.</i> (2006) Koseler (2008)
	Exportación de graneles	Wijnolst (1975)
	Precio de la mercancía	Wijnolst (1975)
	Coste de flete	Wijnolst (1975)
Otras variables	Políticas de Gasto Público en carreteras y ferrocarriles	Ho <i>et al.</i> (2008)
	Tiempo de atraque	Koseler (2008)
	Número de buques	Koseler (2008)
	Beneficio	Koseler (2008)
	Mano de Obra	Koseler (2008)
	Coste de Transporte	Koseler (2008)

Tipo Variable	Variable Utilizada	Fuente / Autor
	Inversiones y tecnología	Koseler (2008)
	Tiempo de servicio a buques	Koseler (2008)
Stock/ Niveles /Variables de Estado	Inventario de contenedores	Koseler (2008)
	Volumen de Contenedor	Yeo <i>et al.</i> (2013)
	PIB	Mingming (2011) Li y Wang (2012)
	Trabajos pendientes / en cola en el Hinterland	Dalziell y McManus (2004)
	Capacidad del puerto / Transbordo	Ho <i>et al.</i> (2008) Park <i>et al.</i> (2012a)
	Mercancía a bordo / Mercancía entregada	Engelen <i>et al.</i> (2011)
	Capacidad movida desde otro Puerto	Dalziell y McManus (2004)
	Capacidad del puerto	Mingming (2011) Li y Wang (2012)
	Barcos, Almacenamiento	Dikos <i>et al.</i> (2006)
	Barcos en puerto	Omer <i>et al.</i> (2012)
Flujo / Ratio / Variables Derivadas	Barcos	Omer <i>et al.</i> (2012) Cheng <i>et al.</i> (2010) Engelen <i>et al.</i> (2011)
	Contenedores	Yeo <i>et al.</i> (2013)
	Contenedores vacíos	Koseler (2008)
	Capacidad (Grúas, Puerto)	Dalziell y McManus (2004) Mingming (2011)
	Fletes / Flotas	Dalziell y McManus (2004)

Tipo Variable	Variable Utilizada	Fuente / Autor
		Ho <i>et al.</i> (2008) Li y Wang (2012) Park <i>et al.</i> (2012a)
	Monetario	Mingming (2011) Li y Wang (2012)
	Ratio de coste en construcción nuevos barcos	Dikos <i>et al.</i> (2006)
	Ratio de almacenamiento	Dikos <i>et al.</i> (2006)
	Ratio de acharramiento / fallas	Dikos <i>et al.</i> (2006)
Variables de Retraso / Demora	Demora en la demanda por la expansión de capacidad	Ho <i>et al.</i> (2008)
	Retraso entre la petición de servicio y el despacho del buque	Dikos <i>et al.</i> (2006) Engelen <i>et al.</i> (2006)
	Retraso entre la inversión del Puerto y el incremento en la capacidad del puerto	Mingming (2011)

Fuente: Oztanriseven *et al.* (2014) y elaboración propia.

Tabla 17. Clasificación de modelos SD en ambientes portuarios atendiendo a propiedades de integración, horizonte temporal y dificultades intrínsecas del modelo.

Tipo clasificación	Subclase		Fuente / Autor
Integración con otros modelos o subsistemas	Optimización de redes (“ <i>Network optimization</i> ”)		Croope y McNeil (2011)
	Modelos Económicos <i>Input-Output</i>		Xing (2012) Li y Wang (2012)
	Otros modelos econométricos		Li y Wang (2012)
	Regresión Estadística		Lattila (2008) Park <i>et al.</i> (2012a)
Horizonte de simulación y tiempos de paso (time step o “TS”)	Horas	720 y 1500 Horas	Lattila y Saranen (2011)
	Días	2 y 4 Días	Croope y McNeil (2011)
		360,750, y 1500 Días, “TS”=1Día	Lattila (2008)
		250 y 730 Días	Lattila y Saranen (2011)
	Meses	170 Meses, “TS”=1 Mes	Engelen <i>et al.</i> (2006)
		72 Meses, “TS”=0.25 (es decir, semanas)	Engelen <i>et al.</i> (2009)
	Años	1970 - 2020, “TS”=1 Año	Yeo <i>et al.</i> (2013)
		10 Años	Ho <i>et al.</i> (2008)
		1990-2050	Fiorello <i>et al.</i> (2010)
		2007-2009, “TS”=1 Año	Mingming (2011)
		2007-2025	Li y Wang (2012)
		1950-2010, “TS”=1 Año	Randers y Göluke (2007)
		1980-2002, “TS”=1 Trimestre	Dikos <i>et al.</i> (2006)
		1970-2010, “TS”=1 Año	Wijnolst (1975)

Tipo clasificación	Subclase		Fuente / Autor
Retos y Dificultades del modelo		1998-2007	Park <i>et al.</i> (2012a)
		2010-2030	Lattila (2008)
	Relacionados con los datos	Disponibilidad	Engelen <i>et al.</i> (2009) Dikos <i>et al.</i> (2006) Videira <i>et al.</i> (2012) Lattila (2008) Santella <i>et al.</i> (2009)
		Precisión y fiabilidad	Ho <i>et al.</i> (2008) Dikos <i>et al.</i> (2006)
		Transformación	Lattila (2008)
	Relacionado con la complejidad del modelo	Tamaño de modelo manejable	Randers y Göluke (2007) Fiorello <i>et al.</i> (2010)
		Definición de la métrica del sistema para evaluar su rendimiento y expresar sus resultados	Dalziell y McManus (2004) Croope y McNeil (2011)
		Identificación de las interdependencias entre variables y feedbacks	Lattilay Saranen (2011) Croopey McNeil (2011) Li y Wang (2012) Santella <i>et al.</i> (2009)
		Cuantificación de las dependencias entre las distintas variables	Ho <i>et al.</i> (2008) Engelen <i>et al.</i> (2006) Santella <i>et al.</i> (2009)
		Número elevado de hipótesis requeridas en la implantación del modelo	Croopey McNeil (2011)

Tipo clasificación	Subclase	Fuente / Autor
	Detectar los cambios en el sistema a lo largo del tiempo	Croopey McNeil (2011)
	Entidades que conforman el modelo que presentan características heterogéneas	Silva <i>et al.</i> (2011)
	Amplitud y diversidad de grupos de interés y dificultad de manejo de la información	Videira <i>et al.</i> (2012)

Fuente: Oztanriseven *et al.* (2014) y elaboración propia.

3.4.2 Software para la realización de simulaciones SD en entorno portuario.

Para la realización de ejercicios prácticos de modelización con SD se cuenta con múltiples opciones y posibilidades ofertadas por distintas marcas comerciales (software comercial) o centros de educación o investigación (software educativo). En la siguiente tabla se presentan hasta 25 ejemplos con indicación del lenguaje de programación donde cada uno de estos simuladores está programado, la última versión conocida del software y una dirección de internet donde se puede conseguir mayor información sobre el mismo.

Tabla 18. Software disponible para realización de modelos SD.

<u>Paquete</u>	<u>Lenguaje de implementación</u>	<u>Última versión</u> ²³⁸	<u>Fuente</u>
AMESim	Plataforma que permite intercambio de información con Matlab/Simulink®	2017	www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/imagine-lab/amesim/
Analytica®	C++	2016	http://www.lumina.com
AnyLogic®	Java	2017	http://anylogic.com
ASCEND®	C	2012	http://ascend4.org
Berkeley Madonna	C++, Java	2016	http://berkeleymadonna.com

²³⁸ Última a la fecha de redacción de este apartado (11/11/2014)

<u>Paquete</u>	<u>Lenguaje de implementación</u>	<u>Última versión</u> ²³⁸	<u>Fuente</u>
Consideo/iMODEL LER®	Java (en servidor) Java Script (lado cliente)	2017	http://www.consideo-modeler.de
DYNAMO	AED, Pascal	1986	No disponible (descontinuado)
Dynaplan Smia	C++	2013	http://www.dynaplan.com
Forio Simulations®	Sistema que permite su utilización web sobre diversas plataformas como Vensim, Julia, R y Python	2016	http://www.forio.com
GoldSim	C++	2016	http://www.goldsim.com
Insight Maker®	JavaScript	2017	http://www.InsightMaker.com
JDynSim®	Java	2010	http://code.google.com/p/dynsim
MapleSim®	Java (GUI), C y Maple (engine)	2017	http://www.maplesoft.com/products/maplesim
Mapsim®	Microsoft .NET Framework	2013	http://mapsim.sourceforge.net
Minsky	C++	2017	http://sourceforge.net/projects/minsky
NetLogo®	Java, Scala	2015	http://ccl.northwestern.edu/netlogo
OptiSim®	Java	2010	http://www.optisim.org/QLENG
Powersim Studio®	C++	2015	http://www.powersim.com
Pyndamics®	Python	2013	http://code.google.com/p/pyndamics/
PySD	Python	2016	http://github.com/JamesPHoughton/pysd
RecurDyn®	C++	2013	http://www.recurdyn.de
Simantics SD®	Java, Modelica	2015	http://sysdyn.simantics.org
Simile®	C++, Prolog, Tcl	2013	http://www.simulistics.com

<u>Paquete</u>	<u>Lenguaje de implementación</u>	<u>Última versión</u> ²³⁸	<u>Fuente</u>
Simulink®	Matlab ²³⁹	2012	http://www.mathworks.com/products/simulink
Simplorer	Plataforma que permite intercambio de información con diversos lenguajes: VHDL-AMS (IEEE 1076.1), Modelica, SML ²⁴⁰ , FMI ²⁴¹ , C/C++, SPICE.	2017	www.ansys.com/products/systems/ansys-simplorer
Sphinx SD Tools ®	Java	2013	http://sourceforge.net/projects/sphinxes
Stella ²⁴² , iThink®	Stella ²⁴³	2013	http://www.iseesystems.com/
Sysdea®	Java	2013	http://sourceforge.net/projects/system-dynamics/
SystemDynamics	Java	2009	sourceforge.net/projects/system-dynamics
TRUE® ²⁴⁴	WLanguage Windev	2014	http://www.true-world.com
Vensim ®	C	2016	http://vensim.com
Ventury	C	2017	http://ventury.biz
VisSim ®	C	2011	http://www.vissim.com
Wolfram SystemModeler	Wolfram Language	2017	www.wolfram.com/system-modeler

²³⁹ Simulink es un entorno de programación visual que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

²⁴⁰ Acrónimo de “*Simplorer modeling language*”.

²⁴¹ Acrónimo de “*functional mock-up interface*”.

²⁴² Acrónimo de “*Systems Thinking, Experimental Learning Laboratory with Animation*”.

²⁴³ Lenguaje de programación propio basado en principios de programación visual. Este sistema fue introducido en 1985 por Barry Richmond y ha sido una de las herramientas más utilizadas tanto con fines comerciales como académicos por su bajo coste y fácil utilización.

²⁴⁴ TTRUE: “*Temporal Reasoning Universal Elaboration*”.

Fuente: Wikipedia Software SD (2017).

Tomando como base los estudios de Oztanriseven *et al.* (2014) pero ampliándolos con nuevos casos que se han introducido en puntos previos de este capítulo, se presenta en la tabla 19 una referencia con el software utilizado por distintos autores para la realización de simulaciones SD en entornos marítimo - portuarios.

Se llega a la conclusión que entre los trabajos analizados y que proporcionan datos sobre la herramienta utilizada; los autores prefieren mayoritariamente Vensim ® (13 autores) seguido de Dynamo (7 autores), PowerSim ® (5 autores), SysDyns (2 autores), Simulink ® (2 autor), Stella ® (1 autor), iThink ® (1 autor) y ESCOT (1 autor).

Tabla 19. Software más extendidos para la realización de simulaciones SD entornos portuarios.

SOFTWARE UTILIZADO	AUTORES
VenSim ®	<ol style="list-style-type: none"> 1. Han (2006) 2. Engelen <i>et al.</i> (2006) 3. Cui (2007) 4. Latilla (2008) 5. Santella <i>et al.</i> (2009) 6. Fiorello <i>et al.</i> (2010) 7. Luan <i>et al.</i> (2010) 8. Fiorello <i>et al.</i> . (2010) 9. Pawlas y Zall (2012) 10. Omer <i>et al.</i> (2012) 11. Wang <i>et al.</i> (2013a) 12. Yeo <i>et al.</i> (2013) 13. Li y Wang (2012)
Dynamo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Munitic <i>et al.</i> (1990) 2. Munitic y Šimundić (2000) 3. Munitic <i>et al.</i> (2003a, 2003b, 2003c y (2007); Dvornik <i>et al.</i> (2006)^{245, 246} 4. Munitic <i>et al.</i> (2003d y 2003e) y Munitic <i>et al.</i> (2003f) 5. Dikos <i>et al.</i> (2006) 6. Dundovic <i>et al.</i> (2009)

²⁴⁵ Introducido en Deng (1982) para escenarios de previsión con gran incertidumbre y falta de datos.

²⁴⁶ Todos estos trabajos son el mismo proyecto pero presentados en diferentes foros y/o formatos por lo que a efectos de cómputo se considera una única aplicación.

SOFTWARE UTILIZADO	AUTORES
	7. Park <i>et al.</i> (2012a)
PowerSIM ®	1. Munitic <i>et al.</i> (2003a, 2003b, 2003c y 2007); Dvornik <i>et al.</i> (2006) 2. Briano <i>et al.</i> (2008), Revetria <i>et al.</i> (2008) y Briano <i>et al.</i> (2009) 3. Dundovic <i>et al.</i> (2009) 4. Carlucci y Cira (2009) 5. Caballini <i>et al.</i> (2012)
SysDyns	1. Munitic <i>et al.</i> (1990) 2. Munitic y Šimundić (2000)
Simulink ®	1. Wijnolst (1975) 2. Li <i>et al.</i> (2010a)
ESCOT	1. Schade y Schade (2005)
iThink ©	1. Cheng <i>et al.</i> (2010)
Stella ©	1. Croope y McNeil (2011)

Fuente: Elaboración propia basada en un primer trabajo de Oztanriseven *et al.* (2014).

Como se ha analizado con anterioridad, el paquete comercial más utilizado hasta la fecha ha sido el VenSim ®, cuya última versión (Vensim 7.0) fue lanzada en 2017 y es desarrollada por la empresa Ventana Systems, Inc.²⁴⁷ y comercializada en España por ATC Innova²⁴⁸; compañía creada en 1985 y que lanzó su primer simulador VenSim en 1988.

El éxito de este software ha sido su bajo precio, versatilidad, sencillez y constante evolución y actualización²⁴⁹; pudiendo crearse tanto los diagramas causales como los diagramas de flujo y stocks de una manera muy intuitiva y amigable y contando con un potente editor de ecuaciones que facilita la construcción de los modelos para un usuario sin excesiva experiencia en modelización (ilustración 118).

Es un software además que trabaja tanto en entornos Windows (95/98/Millennium/NT/2000/XP/Vista) como Power Macintosh (versión 7 o superior) y permite

²⁴⁷ Más información sobre el producto y la compañía se puede obtener en su página web: <http://vensim.com>

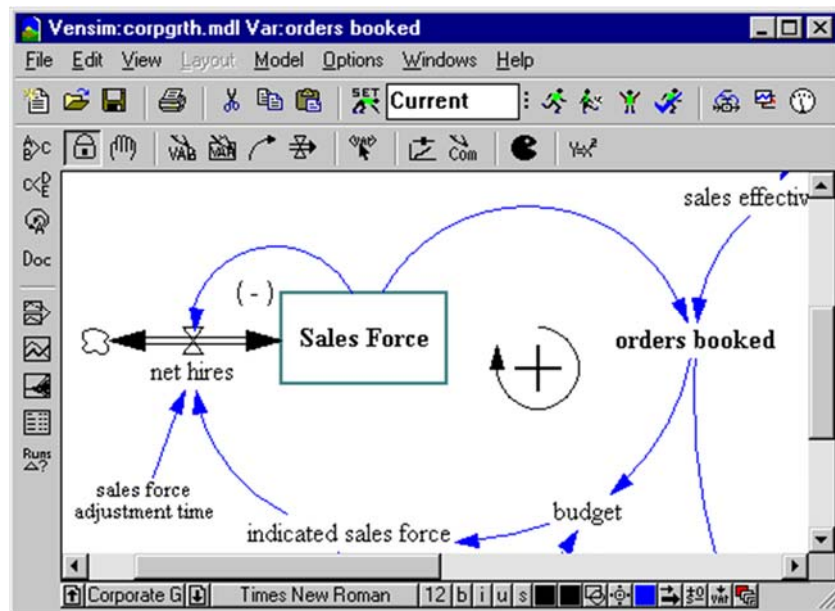
²⁴⁸ Para más información sobre ATC-Innova se puede consultar su página web: <http://atc-innova.com>

²⁴⁹ Se puede encontrar una descripción muy comprensiva de la evolución de este simulador y una historia de todas las versiones y que han ido progresivamente incorporando en <http://vensim.com/vensim-history/>

acoplarse con subrutinas programadas en otros muchos lenguajes (C, C++, Visual Basic, Delphi,..) para usuarios más avanzados.

Presentan, además, buena conectividad dado que permite importar y exportar datos a aplicaciones como hojas de cálculos (Microsoft Excel o Lotus123). Según el profesor Juan Martín García de la Universidad Politécnica de Cataluña y experto en SD, VenSim “*es quizá el software más completo y versátil que existe en la creación de modelos SD, permitiendo cubrir todos las áreas propias de la modelización, desde los modelos más sencillos a los más complejos*”²⁵⁰.

Ilustración 118. Ejemplo de creación de diagramas con el software VenSim ®.



Fuente: <http://vensim.com/>

Como se recoge en la tabla 19, DYNAMO es especialmente utilizado por la escuela croata y fuera de ésta y más recientemente por Park *et al.* (2012a). Esta aplicación, de carácter científico y no puramente comercial, se encuentra ciertamente discontinuada y no se hace una descripción más detallada aquí pues ha sido ampliamente descrita en apartados anteriores.

Por su parte Powersim Studio ® es un software de simulación SD comercializado por la empresa noruega Powersim Software AS²⁵¹ y que en la actualidad se encuentra en versión 10 lanzada en Noviembre 2014. Al igual que el anterior es un software intuitivo diseñado para trabajar en entornos Windows (XP/Vista/7 u 8) y permite importar datos tanto de hojas de cálculo (Excel) como bases de datos (Oracle, SQL,...). Es un software que ha tenido muchas aplicaciones en

²⁵⁰ Extraído de <http://www.dinamica-de-sistemas.com/wds3.htm>

²⁵¹ Más información sobre el producto y la compañía se puede obtener en su página web <http://www.powersim.com/>

modelización financiera, gestión de clientes, análisis de producción, recursos humanos y desarrollo de nuevos productos.

Actualmente, tanto Stella © como iThink © son desarrollados por la compañía ISEE Systems²⁵² (anteriormente *High Performance Systems* fundada en 1985 por Barry Richmond profesor de Dartmouth College en Hanover, Estados Unidos). Esta fue quizá la primera compañía en generalizar el uso de SD cuando en 1987 fueron premiados con el premio Jay Forrester tras el lanzamiento de su primera versión de Stella (software orientado a la enseñanza e investigación) al que le seguiría en 1990 con el lanzamiento de iThink (software con vocación comercial para su implantación en el mundo de la empresa).

A la fecha de redacción tanto Stella © como iThink © se encuentran en versión 10.0.6. Al igual que los anteriores, Stella soporta Microsoft Windows (XP/Vista/7/8) o Mac (OS 10.6 o superior) requiriendo más espacio de disco duro para su instalación (200 MB) pero contando ya con una app específica para su utilización en iPad.

En lo que se refiere a Simulink ®, es un software actualmente comercializado por The MathWorks, Inc²⁵³ empresa creada en 1984 y que requiere de un compilador C++ (actualmente soporta las versiones C++ 2013, C++ 2012, C++ 2010 y C++ 2008 Profesional) o Windows SDK (actualmente soporta SDK 7.1 y SDK 6.1) para su funcionamiento.

Es un software que se integra con otro paquete de software de programación paralela comercializado por la misma compañía conocido como MATLAB®, lo que permite incorporar algoritmos de este paquete en los modelos y exportar los resultados de la simulación al mismo para llevar a cabo análisis más complejos y por tanto requiriendo de conocimientos avanzados si se quiere utilizar ésta posibilidad.

Presenta además extensiones para hacer modelizaciones 3D. Este software ha sido principalmente utilizado (contando con extensiones o aplicaciones específicas) en la industria aeroespacial, comunicaciones y redes y producción industrial pero con escasa penetración hasta el momento en campos logísticos o de transporte.

En lo que se refiere a los modelos ESCOT y SYSDYNS, desarrollados el primero en Schade y Schade (2005) y el segundo en Munitic *et al.* (1990) y Munitic y Šimundić (2000); cabe señalar que, como ya se ha puesto de manifiesto, se trata también de software *ad hoc* en el programa de desarrollos científicos concretos y por lo tanto sin repercusión o penetración comercial que merezca la pena comentar en este punto.

²⁵² Más información sobre el producto y la compañía se puede obtener en su página web: <http://www.iseesystems.com/>

²⁵³ Más información sobre el producto y la compañía se puede obtener en su página web <http://es.mathworks.com/products/simulink/>

3.5 Criterios para la selección de herramientas de simulación.

A la hora de enfrenarse a un modelo portuario, Angeloudis y Bell (2011) indican que, con carácter previo, deben definirse los objetivos del mismo y especificar sus atributos con objeto de enfocar su desarrollo. Como criterios de clasificación indican:

- Naturaleza del modelo: Dentro de este atributo indican si el mismo debe tener una naturaleza estática o una dinámica, aspecto que tiene que ver con que el sistema varíe o no con el tiempo. Con carácter general los modelos portuarios son de naturaleza dinámica ya que a lo largo del tiempo el estado del sistema va variando conforme se producen las operaciones portuarias²⁵⁴.
- Fidelidad requerida en el modelo: Aquí los autores definen lo que llaman modelos microscópicos por contraposición a otros que definen como macroscópicos. Si el modelo arroja datos precisos con detalle y reproduce la interacción de todos los agentes del sistema, el modelo será microscópico (u operacional). Si el modelo es suficientemente valido usando datos agregados el modelo será macroscópico (o estratégico). Así, si se está investigando un plan de estiba de un buque o la gestión de un parque de contenedores y las operaciones de transferencia de contenedores no habrá más remedio que acudir a un modelo micro (la posición de cada contenedor individual es relevante), mientras que si lo que se quiere es únicamente reproducir la secuencia de llegada de buques y asignación de grúas un modelo macro sería suficiente (en este modelo el movimiento de cada contenedor específico no tiene importancia y el modelo puede operar con distribuciones de ley de llegada de buques y tiempo de operación del mismo en muelle).
- Propósito o ámbito del modelo. En este apartado los autores se refieren a que el modelo trate de cubrir un amplio espectro de operaciones de la terminal (conceptualmente se refieren a modelos integrados) o un campo más estrecho de investigación (modelos aislados) y diferencian también entre modelos de negocio (los que se usan para tomar decisiones) y los educacionales (los que se usan para entrenamiento).
- Timing. Aquí diferencian entre modelos continuos, en tiempo discreto (*discrete time*) o de eventos discretos (*discrete event*). Los modelos continuos son más típicos en el campo de las ciencias físicas o finanzas y se usan para describir el estado de un sistema en cualquier momento usando típicamente para su programación ecuaciones diferenciales. Los modelos discretos son aquellos que son suficientemente representados en intervalos de tiempo entre

²⁵⁴ Un sistema estático sería por ejemplo un modelo de respuesta de una estructura portuaria sometida a unas cargas determinadas. Si las cargas no varían y la infraestructura es estable a esta solicitación el sistema se mantiene invariante en el tiempo. Este tipo de modelos estructurales no son objeto de la presente tesis doctoral y entroncan directamente con otros aspectos de ingeniería portuaria.

los cuales los cambios del sistema se producen de manera abrupta ante la aparición de ciertos eventos (eventos discretos) o intervalos fijos de tiempos (tiempos discretos)

Los modelos DES mantienen un núcleo central de eventos que son procesados de manera secuencial y que no usan intervalos fijos de tiempo para hacer avanzar el reloj de la simulación. En este sentido el modelo puede realizar saltos de tiempo avanzando al momento exacto del siguiente evento (sin necesidad de perder tiempo en pasos intermedios del modelo que no harían cambiar el estado del sistema). Desde este aspecto los modelos DES son la opción más adecuada cuando la mayoría de las variables no cambian con frecuencia a lo largo del tiempo.

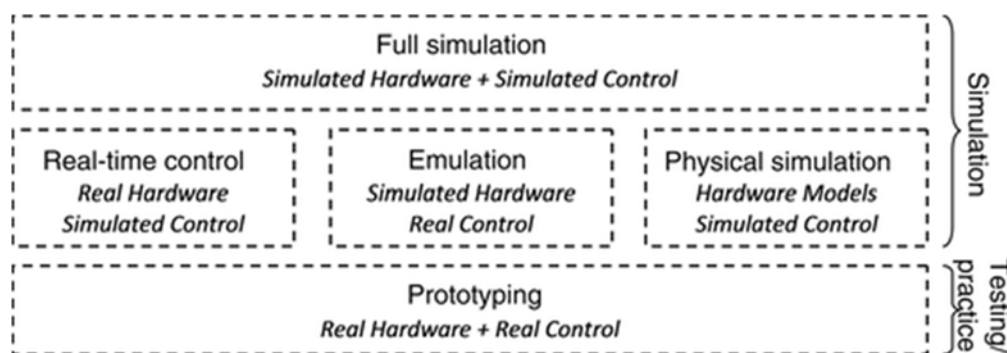
Si el modelo DES está bien construido (la secuencia de eventos está convenientemente programadas) estos modelos no están sometidos a inexactitudes asociadas con pasos fijos de tiempo (donde se puede perder un cambio de estado).

En modelos microscópicos (por ejemplo un modelo integrado de gestión de una terminal de contenedores) la complejidad y número de interacciones entre agentes es tan grande (la escala del modelo de tal tamaño) que puede ser preferibles desde el punto de vista computacional implementar modelos en tiempo discreto (*discrete time*) en vez de modelos de eventos discretos.

- Tipo de desarrollo / herramienta a utilizar. Aquí indican aquellos que utilizan herramientas de simulación genérica (simuladores o paquetes de simulación de propósito general que denominan *Generic Simulation Tools* o *GSTs*) de otros que utilizan librerías de simulación de cierto programas (también herramientas de propósito general) y de aquellas herramientas de propósito específico y que definen como DSE (de *Domain-Specific Extensions*)
- Composición del modelo. Los autores establecen la dependencia del modelo de las componentes reales del sistema que quieren representar. Diferencian entre los modelos de simulación propiamente dichos (en los que el *hardware* y el control del modelo o *software* es simulado) y los prototipos (en los que tanto el *hardware* como el control del modelo son reales). Los primeros son los utilizados en entornos puros de simulación, mientras que los segundos son implementados en los campos de entrenamiento y formación de personal, verificación de herramientas de control y gestión a ser implementadas en una terminal y ejercicios de operación real simulada.

Entre ambos extremos se encuentran los ejercicios de control en tiempo real (en este caso el *hardware* es real pero el control es simulado), los ejercicios de emulación (el control es real mientras que el *hardware* no es el equipamiento real de la terminal) o la simulación física (en el que el control es simulado y el equipamiento es un modelo del equipamiento real). Esta clasificación la representan gráficamente en la ilustración 119.

Ilustración 119. Clasificación de los modelos de simulación en función de su composición y dependencia con elementos reales del sistema.



Fuente: Angeloudis y Bell (2011).

Para explicar este concepto dentro del contexto portuario, Angeloudis y Bell (2011) recuerdan que una terminal está compuesta por de cinco elementos: la infraestructura, su equipamiento, el personal, los procedimientos de trabajo y el software.

La infraestructura, equipamiento y personal entrarían dentro del apartado del “*hardware*” indicado en la ilustración 119 mientras que los procedimientos y el *software* dentro del apartado de “control” de esa misma figura.

Así en un ejercicio de simulación puro (*full simulation*) los cinco elementos son simulados sin utilizar ningún elemento real de la terminal. La mayoría de los modelos que pueden verse referenciados en la literatura científica y que se han indicado hasta el momento son de este tipo.

Efectivamente, hasta este punto de la tesis se han recogido ejercicios de simulación puro. Sin embargo, hoy en día están tomando cada vez más importancia las herramientas de emulación y comenzando a implantarse (desde las perspectiva del diseño de operaciones) los ejercicios de simulación física (modelos a escala). En el siguiente punto se tratan estos sistemas.

3.6 Modelos de emulación en puertos y *Terminal Operating System* (“TOS”)

Tal y como pone de manifiesto Saanen (2002), con el tiempo está creciendo la utilización de ejercicios de emulación en puertos. En este sector, la emulación podría explicarse del siguiente modo. El software que se utiliza en la simulación es el software existente e implementado en la terminal. Por ello, los procedimientos de la terminal están implícitamente programados en el software, es decir, también se utilizan unos procedimientos reales en el ejercicio de emulación.

De esta manera, el programador se ahorra el esfuerzo de desarrollar un software *ad hoc* para el ejercicio de simulación y se centra en simular las nuevas condiciones de infraestructura (nuevos muelles por ejemplo), equipamiento (por ejemplo nuevas grúas) o personal (nuevos recursos).

Esta tendencia se ha hecho frecuente en la valoración de terminales automatizadas de contenedores (Saanen, 2003 y 2005) y proyectos de gran escala (Angeloudis y Bell, 2011), existiendo incluso paquetes de emulación específicamente diseñados para puertos como el *TBA emulation Platform*, también conocido como CONTROLS (Boer y Saanen, 2008²⁵⁵ y TBA, 2017d); ViTo y SCUSY desarrollados por el Institute of Shipping Logistics (ISL – ViTO, 2010 e ISL – VITO, 2009); O-CPS, desarrollado por Total Soft Bank in Korea y; LIMEN, producto de PortEC (Angeloudis y Bell, 2009 y 2010). Se analizarán a continuación estos sistemas junto con otros que quizá hayan tenido menor difusión en la industria.

Para empezar esta revisión se citará en primer lugar los modelos desarrollados por la empresa TBA²⁵⁶ y cuyo autor es Yvo Saanen (Saanen 2005 y 2008). Estos modelos han sido usados según sus desarrolladores en más de 500 ejercicios de simulación en puertos de todo el mundo. Cuenta con librerías específicas para el análisis de terminales de contenedores conocidas como TBA TIMESQUARE (TBA, 2017a) y TBA TRAFALQUAR (TBA, 2017a); así como un desarrollo específico para terminales de graneles y carga fraccionada elaborado como una versión de TBA TRAFALQUAR y que denominan TBA TRAFALQUAR – Bulk (TBA, 2017c).

Conforme se observa en TBA (2017a), TIMESquare es el acrónimo de “*Terminal In-depth Models for Evaluation Studies*” y es un modelo de naturaleza microscópica lanzado en 1999 (TBA, 2017e) en el que se detalla toda la terminal y el proceso de manipulación de contenedores desde el barco a la zona de almacenamiento. Este *software* permite introducir en el modelo el computamiento de las grúas de muelle, el proceso transporte horizontal con todo tipo de vehículos (trucks, SC’s²⁵⁷, reach stackers, ALV’s²⁵⁸ o AGV’s²⁵⁹), el funcionamiento del patio de contenedores (incluyendo la operación tanto con RMG’s²⁶⁰, como RTG’s²⁶¹, OBC’s²⁶² o SC’s).

²⁵⁵ Estos autores presentan un proyecto con fines esencialmente educativos. Mediante TBA Virtual Reality TOS (basado en el software de emulación CONTROLS de la compañía TBA) pretenden realizar programas de entrenamiento para los operadores de las terminales, proyecto que llevan a la práctica con personal de las terminales de Amsterdam (Holanda), Rotherdam (Holanda), Hon Kong (China), Notfolk (Reino Unido) y Virginia (Estados Unidos).

²⁵⁶ TBA es el acrónimo del holandés *Technisch Bestuurskundig Adviesburo*, una compañía fundada por Yvo Saanen en 1996 en Delft (Holanda), especializada en el diseño de modelos y soluciones avanzadas en entorno portuario (TBA 2017f).

²⁵⁷ SC’s es el acrónimo de *Straddle Carriers*.

²⁵⁸ ALV’s es el acrónimo de *Automated Lifting Vehicles*.

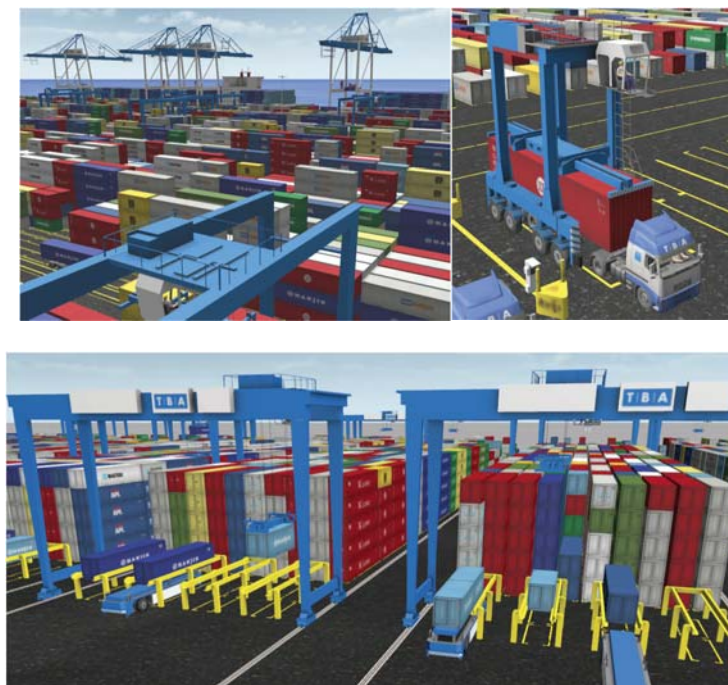
²⁵⁹ AGV’s es el acrónimo de *Automated Guided Vehicles*.

²⁶⁰ RMG’s es el acrónimo de *Rail Mounted Gantry Cranes*.

²⁶¹ RTG’s es el acrónimo de *Rubber Tired Gantry Cranes*.

²⁶² OBC’s es el acrónimo de *Overhead Bridge Cranes*.

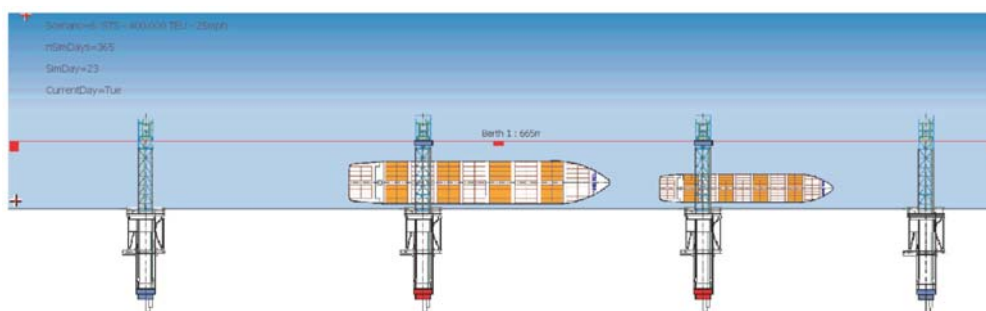
Ilustración 120. Imágenes del modelo de simulación portuaria construido mediante TIMESQUARE © de la empresa TAB.



Fuente: TBA (2017a).

De acuerdo con TBA (2017b), TRAFALQUAR es el acrónimo de “*TRAFFic Analysis of QUAY Rail and Road*”, siendo un modelo de naturaleza macroscópica lanzado en 2006 (TBA, 2017e) que se centra en la llegada de buques a puerto y el correspondiente BAP y la operación de éste con la programación y asignación de grúas de muelle o QCSP y QCAS (ilustración 121).

Ilustración 121. Imágenes del modelo de simulación portuaria construido mediante TRAFALQUARE © de la empresa TAB.



Fuente: TBA (2017b).

EL módulo TRAFALQUAR – Bulk (TBA, 2017c) es una extensión de la propia librería TAFALQUAR y que permite para terminales de graneles y carga general convencional verificar sistemas de planificación, valorar la capacidad de las terminales, evaluar mejoras en los procesos

y chequear las especificaciones y funcionamiento del software de gestión de la terminal (TMS o *Terminal Management System*) (ilustración 122).

Ilustración 122. Imágenes del modelo de simulación portuaria construido mediante TRAFALQUARE –BULK © de la empresa TBA.

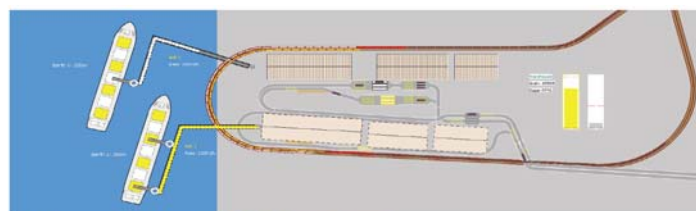


Figure 1: Overview of a simulation model for a Bulk Handling Terminal



Figure 2: Detail equipment kinematic behavior & process description



Figure 3: Dynamic Daily Storage Analysis - For an entire year

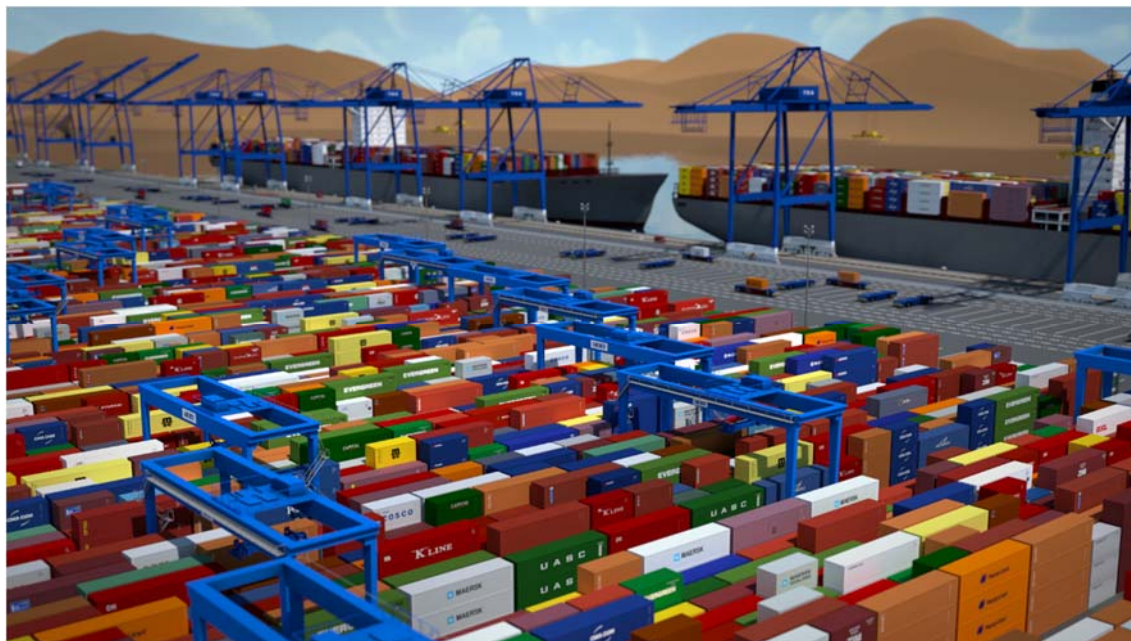
Fuente: TBA (2017c).

CONTROLS es el acrónimo de “*CONtainer TeRminal Optimised Logistics Simulation*”, y es un software desarrollado por la empresa TBA a modo de emulador de un TOS (acrónimo anglosajón que significa “*Terminal Operating System*”²⁶³).

Este software permite hacer una comprobación de un TOS antes de su implementación (*TOS-testing*) (TBA 2017d), realizar ajustes en el mismo una vez que se ha implementado (*TOS-tunning*) (TBA 2017h), o llevar a cabo programas de entrenamiento y capacitación para el personal de la terminal (TBA, 2017g). La primera versión de CONTROLS (CONTROLS1) es lanzada en 2005 con una segunda versión (CONTROLS2) en 2007 y una herramienta de mejora de visualización en 2017 (CONTROLS-Event Viewer).

²⁶³ Los TOS cobran hoy una especial relevancia en la gestión de terminales (especialmente en la de contenedores), donde se integran en el día a día de la misma y permiten realizar tareas de planificación a largo plazo, programación de medios a medio o corto plazo y control de las operaciones a tiempo real. (Saanen, 2005)

Ilustración 123. Plataforma de emulación de una terminal de contenedores CONTROLS de TBA.



Fuente: TBA (2017d)

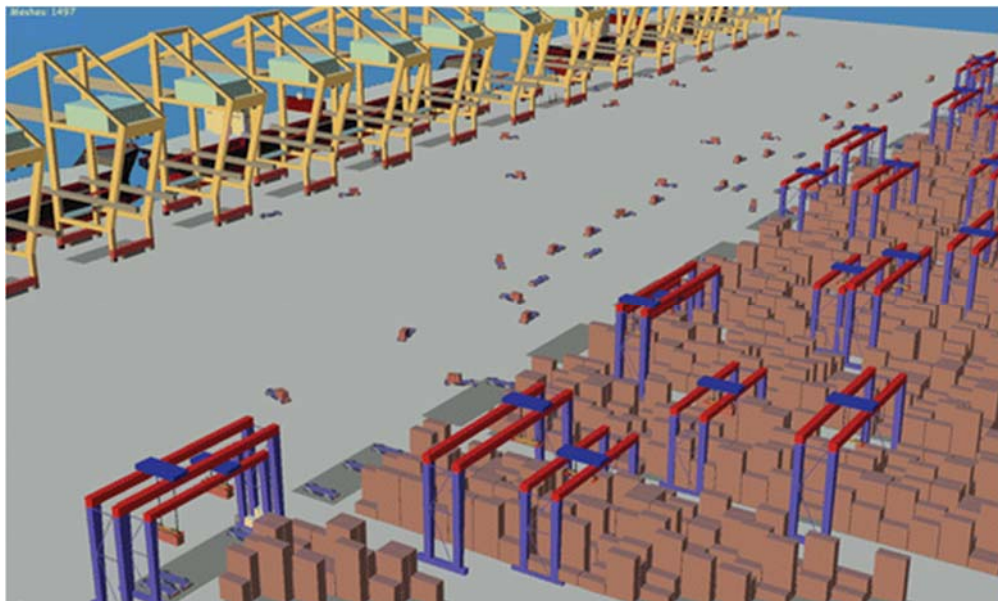
O-CPS es un simulador portuario que se comercializa por Total Soft Bank Co. junto con su sistema de gestión de terminales o TOS denominado CATOS y que puede ser también considerado como un emulador (Total Soft Bank, 2010).

VITO (ISL – VITO, 2010) y SCUSY Logistics (ISL – SCUSY, 1999) son paquetes desarrollados por el Institute of Shipping. VITO es el acrónimo de “*Virtual Terminal Optimization*”).

LIMEN es un simulador portuario desarrollado por PORTeC²⁶⁴ y que se encuentra explicado en Angeloudis y Bell (2009 y 2010). Este simulador que cuenta con herramientas de visualización 3D, utiliza una estructura modular en dos capas en la que en una emula el comportamiento físico del equipamiento de la terminal (*Terminal Emulation Layer*) mientras que en la otra se simulan las decisiones operacionales (*Terminal Operation Layer*). Este simulador es, según sus desarrolladores (PORTec, 2017), capaz de simular tanto terminales de contenedores, como terminales Ro-Ro o de pasajeros habiendo sido aplicado con éxito tanto en trabajos de consultoría como de investigación llevados a cabo por el grupo de investigación (ilustración 124).

²⁶⁴ **PORTeC** es el acrónimo de *Port Operation Research & Technology Center* y es un centro de investigación dirigido por el Dr Panagiotis Angeloudis dentro del Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental del Imperial College de Londres (Reino Unido).

Ilustración 124. Vista de un modelo de una terminal de contenedores construido Limen.



Fuente: Angeloudis y Bell (2011)

PosPort CTS es un producto desarrollado por la firma de ingeniería Royal Haskoning y que fue aplicado en proyectos de esta compañía como el diseño de la terminal de contenedores de Busan (Corea del Sur) o Risavika (Noruega) pero que a la fecha parece estar discontinuado pues no se han encontrado más referencias en nuestra búsqueda ni está referenciado en la página web de dicha empresa. Se trata por tanto de un software desarrollado por esta empresa y no comercializado que ha utilizado en exclusiva en sus proyectos de consultoría e ingeniería y del que no se ha podido encontrar producciones científicas concretas.

Otros TOS más conocidos son SPARC, desarrollado por Navis (Versiant, 2017); OSCAR (TGI, 2017a) y CARROL (TGI, 2017b) sendas herramientas desarrolladas por la empresa *TGI Maritime Software* para la gestión de terminales de contenedores (OSCAR) y terminales RO-RO o de carga general (CARROL); SPACE/TRAFFIC (desarrollado por la empresa COSMOS); INPLAN desarrollado por la empresa INPLAN GmbH Software for Logistics (INPLAN 2017) que destaca por contar con soluciones para todo tipo de terminales incluidas las ya mencionadas RO-RO y contenedores pero también para graneles sólidos, líquidos, terminales multipropósito, etc... o; JTM-JADE, desarrollada por *Jade Software Corporation* y de la que ya se habló referenciándola en JADE (2017a, 2017b y 2017c) y con extensiones para terminales de contenedores, RO-RO, polivalentes y mixtas.

3.7 Modelos de simulación física en puertos: prototyping.

Como último apartado de este capítulo antes de llegar a las conclusiones, se mencionarán los modelos de simulación física aplicados a la gestión de terminales, que en la literatura científica vienen, usualmente, referenciados por su anglicismo “*prototyping*”.

La simulación física se utiliza en aquellos ejercicios en los cuales la fiabilidad de los resultados que se consiguen con un software no son suficientes al propósito buscado.

Un modelo físico pasa por la construcción de una maqueta a escala del puerto (o alguno de sus componentes). Una vez construido se somete este prototipo a condiciones reales verificando la respuesta que presenta. Los modelos físicos se construyen a cierta escala y deben aplicarse en algunos casos reglas de proporcionalidad.

Este tipo de modelos están muy asentados en el campo de la ingeniería portuaria en lo que se refiere al diseño de las instalaciones y son objeto de discusión específica en de la Peña (2006) donde se describen desde el punto de vista teórico y se presentan ejemplos prácticos de su aplicación en el diseño de las obras de Ampliación del Puerto de Ferrol (Galicia, España) que a su vez vienen descritas en de la Peña (2011).

Por citar algún ejemplo de modelos de esta naturaleza se puede hacer referencia a los modelos bidimensionales que se construyen en un canal de experimentación de un laboratorio (ilustración 125). En estas instalaciones primero se reconstruyen a determinada escala la sección de un dique de abrigo y todos sus elementos y capas (predimensionados previamente mediante formulaciones analíticas clásicas). Más tarde dicha sección a escala es sometida a la acción de un oleaje de diseño (oleaje que se genera también a escala mediante unas palas en el laboratorio). Sometido el dique de abrigo a estas solicitaciones se comprueba si el diseño es válido (el dique resiste la acción de oleaje de diseño) o es necesario optimizarlo (bien porque el dique no resiste o bien porque se comprueba que está sobredimensionado pudiendo aligerar la sección sin comprometer su estabilidad estructural)(ilustración 126).

Ilustración 125. Canal de experimentación del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid (España).



Fuente: de la Peña (2006)

Ilustración 126. Ensayo 2D de comprobación de la estabilidad estructural del manto de dique del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España).



Fuente: de la Peña (2006)

En el caso de que las respuestas de la estructura en dos planos dimensionales sean relevantes se construyen prototipos similares a los bidimensionales anteriormente citados, pero, en este caso en una piscina o tanque (en vez de en canal) y reproduciendo la misma en tres dimensiones (ilustración 127 a ilustración 129). Esto, usualmente, se hace cuando los trenes de oleaje que solicitan la estructura pueden tener una componente direccional marcada.

Ilustración 127. Modelo Físico del Morro del Dique del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España).
Alternativa sección en talud.



Fuente: de la Peña (2006).

Ilustración 128 Modelo Físico para ensayo del tronco del Dique del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España). Alternativa sección en talud y morro vertical.



Fuente: de la Peña (2006).

Ilustración 129. Ensayo 3D de comportamiento estructural del dique de abrigo del puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España).



Fuente: de la Peña (2006).

Otro ejemplo sería un modelo de agitación portuaria. En este caso se utiliza también una piscina o tanque de experimentación de un laboratorio. En ésta se construye una maqueta del puerto en tres dimensiones (3D) donde se reproduce con exactitud su lay-out (tanto la configuración de los diques de abrigo como los muelles interiores). Se somete de igual manera la maqueta a la acción de oleaje exterior (generada en unas palas en los límites exteriores del modelo) y se mide en los muelles la agitación que se produce, comprobando si esta es compatible con la operación del buque (un exceso de agitación en la dársena lleva a la imposibilidad de realizar las tareas de carga y descarga).

Se trata por tanto de modelos cuyo objetivo no es el dimensionamiento estructural del puerto sino de investigar sobre las condiciones de operatividad del mismo, o lo que es lo mismo, el número de horas al año que el puerto debe estar inactivo por superarse una agitación interior determinada (compatible con la segura operación de los buques) (ilustración 130).

Ilustración 130. Modelo Físico 3D del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España) para verificación de las condiciones de agitación.



Fuente: de la Peña (2006).

A este modelo de agitación portuaria en tres dimensiones se puede acoplar incluso uno de buque atracado, en el que en el muelle sometido a análisis se incorpora un prototipo de buque a escala. Se dota a este barco en miniatura de sensores que miden sus movimientos (desplazamiento y giros en los tres ejes), ofreciendo información adicional sobre la operatividad del terminal y ayudando a introducir mejoras en el diseño del mismo (existen criterios técnicos de máximos movimientos permitidos en cada uno de los tres planos y de máximos giros admisibles en cada uno de los ejes). (ilustración 131 e ilustración 132)

Ilustración 131. Modelo Físico 3D del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España) para verificación de las condiciones de buque atracado.



Fuente: de la Peña (2006).

Ilustración 132. Prototipo de buque atracado en el modelo del Puerto Exterior de Ferrol (Ferrol, España) para verificación de los movimientos del mismo.



Fuente: de la Peña (2006).

Estos modelos físicos que como se ha comentado están muy asentados en el campo de la ingeniería portuaria (hoy no es concebible realizar una gran obra de ampliación o remodelación

portuaria sin utilizar estas técnicas que proporcionan mejor información que las formulaciones analíticas clásicos o los más modernos modelos de simulación pura) no lo están tanto en el campo de la gestión de las operaciones portuarias en el lado tierra (los modelos anteriores se centran en la interface marítima).

Efectivamente, dentro del campo de análisis de operaciones, una simulación física incluye la ejecución de una réplica de la infraestructura y equipamiento (a tamaño real o en miniatura) que pasa a ser controlado por un software simulado. Este tipo de modelos se ajustan con mayor similitud a la realidad del sistema que representan dando en general mejores resultados, aunque a un coste más elevado y estando limitado el número de entidades que pueden simularse (de ahí que hasta la fecha su grado de penetración en la industria haya estado muy condicionado).

Este tipo de modelos, hasta lo que se ha podido descubrir, fueron introducidos en el ámbito de gestión de terminales por Khoshnevis y Asef-vaziri (2000) en sus estudios sobre una terminal automática de contenedores operada mediante AGVs.

Estos investigadores de la Universidad de California (Estados Unidos) parten de trabajos previos en el campo de producción industrial del primero de los autores junto a otros colegas de dicha institución que recogen en Khoshnevis y Rogers (1983) y Khoshnevis y Kiran (1986). En estos trabajos que sirven de antecedentes, los autores diseñan un prototipo a escala en el que ensayan el rendimiento de una línea de producción y su subsiguiente sistema de almacenamiento y expedición de la mercancía producida (sistemas conocidos en la literatura científica como AS/RS de *Automated Storage and Retrieval Systems*).

Estos sistemas AS/RS con evidentes analogías al funcionamiento de un parque de contenedores están hoy en día ampliamente expandidos en diferentes sectores (pequeño comercio, librerías, almacenes logísticos, ...) y han sido objeto de multitud de artículos científicos especialmente desde comienzos de la década de los 2000²⁶⁵.

Volviendo a los trabajos de Khoshnevis y Asef-vaziri (2000), estos autores se mueven en un plano teórico (tal y como los mismos autores reconocen) tratando de medir la efectividad en la operación de una terminal automática de contenedores en diferentes escenarios experimentales. Para ello

²⁶⁵ Podrían citarse por orden cronológico (primer criterio) y alfabético (segundo) a los siguientes autores: Kim y Seidmann (1990), Park (1991), Knapp y Wang (1992), Taboun y Bhole (1993), Chincholkar *et al.* (1994), Keserla (1994), Sarker y Babu (1995), Chincholkar y Krishnaiah Chetty (1996), Hsieh *et al.* (1998), Park (1999), Zollinger (1999), Malmborg (2000), Rouwenhorst *et al.* (2000), Van den Berg y Gademann (2000), Hsieh y Tsai (2001), Malmborg (2001a), Malmborg (2001b), Park (2001), Malmborg (2002), Van den Berg (2002), Malmborg (2003), Park *et al.* (2003), Hur y Nam (2006), Manzini *et al.* (2006), Park *et al.* (2006), Yin y Rau (2006), Gu *et al.* (2007), de Koster *et al.* (2007), Kuo *et al.* (2007), de Koster *et al.* (2008), Dooly y Lee (2008), Kuo *et al.* (2008), Baker y Canessa (2009), Fukunari y Malmborg (2009), Roodbergen y Vis (2009), Zhang *et al.* (2009), Ekren y Heragu (2011), Marchet *et al.* (2011), Lerher *et al.* (2012), Manzini (2012), Roy *et al.* (2012), Vasili *et al.* (2012), Ekren *et al.* (2013), Lerher (2013), Marchet *et al.* (2013), Ekren *et al.* (2014), Nidhiry y Saravanan (2014), Lerher *et al.* (2014), Yang *et al.* (2014), Lerher *et al.* (2015), Frazell (2016), Kalyanaraman y Keerthika (2016) y finalmente MRS (2017).

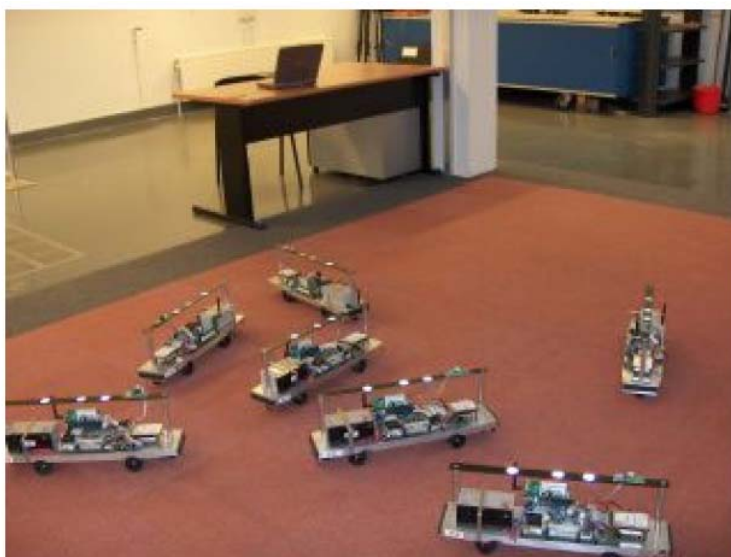
utilizan tres indicadores: rendimiento de la terminal, grado de utilización de espacios y ratio de utilización del equipo de transporte horizontal de contenedores (AGVs).

Esta línea de investigación será retomada por Duinkerken *et al.* (2005 y 2006) en sus estudios de equipamiento de una terminal automática operada mediante AGVs. Estos autores querían superar las limitaciones de las simulaciones clásicas que obligan a los vehículos a seguir caminos fijos (sin ningún tipo de flexibilidad) permitiendo a éstos, en un modelo físico, moverse con mayor grado de libertad con el objetivo de optimizar los resultados y acercarse a la realidad de los terminales. En el modelo usado por estos autores, que había sido ya introducido por van Dam *et al.* (2004) cada vehículo es responsable de planificar su ruta (en vez de ser controlados por un sistema central que da las órdenes a todos ellos).

Los autores proponen un desarrollo en dos fases, primero utilizando técnicas de simulación mediante el software METLAB que contrastan con los resultados de un ejercicio de emulación y por último una fase experimental utilizando ensayos físicos.

En la primera fase se comprueba la validez del sistema desde el punto de vista teórico y en el segundo se pone en práctica el modelo teórico con un prototipo a escala 1:25 (ilustración 133). Obviamente, los protocolos para rectificar trayectorias y evitar colisiones entre vehículos pasan a ser un elemento nuclear de su modelo que explican con cierto grado de detalle.

Ilustración 133. Laboratorio de AGV para el estudio de una terminal automatizada usando modelización física.



Fuente: Duinkerken *et al.* (2006).

Retomando este aspecto crítico del modelo de Duinkerken *et al.* (2005 y 2006), debe señalarse como Adams y Probert (1990) de la Universidad de Oxford (Reino Unido) ya diseñan algoritmos para evitar colisiones de vehículos automáticos que ensayan a tiempo real mediante prototipos

utilizando técnicas de robótica; trabajos que el primero de los autores ya había documentado en Adams (1989) y que probablemente se inspiran en investigaciones previas del laboratorio de inteligencia artificial adscrito al departamento de ingeniería eléctrica y ciencias computacionales del MIT (Lozano-Pérez y Wesley, 1979; Brooks, 1982, 1983, 1984, 1985 y 1986 y Giralt *et al.* 1983) y de trabajos en la misma línea desarrollados por miembros del laboratorio de Inteligencia Artificial de la Universidad de Standford (California, Estados Unidos) (Khatib y Le Maitre, 1978; Khatib 1980, 1983, 1985, 1986, 1987; Khatib y Burdick, 1987).

Ko (1996) y más tarde Wu *et al.* (1999) continúan con esta técnica de investigación mediante prototipos en el diseño de los caminos a seguir por un AGV. En concreto estos autores desarrollan un algoritmo de enrutamiento mediante algoritmos de control lógico tipo Fuzzy²⁶⁶ que verifican desde el punto de vista físico con modelos a escala de este tipo de vehículos. Clasifican este tipo de estudios como un emergente campo de investigación a finales de la década de los 90 que denominan *Robotic Research*.

Ridolfi *et al.* (2014) realizan trabajos similares de análisis mediante prototipos del comportamiento de AGV's, si bien estos están fuera del contexto específico de terminales marítimas y abordados de una manera genérica para cualquier tipo de aplicación industrial, se citan por ser estudios también extrapolables al contexto de una terminal automatizada de contenedores.

Estos autores se refieren a esta técnica (que nombran como *mechatronics*) como un campo multidisciplinar dentro del área de las ciencias aplicadas que resulta útil tanto para actividades de investigación [operativa] como de enseñanza. Para estos autores el uso de prototipos a escala de estos medios puede cubrir diferentes objetivos: diseño de los componentes mecánicos, verificación de las condiciones de estabilidad del vehículo (se refieren específicamente a los sistemas de control de vuelco²⁶⁷) y desarrollo de los sistemas de control del movimiento de los vehículos.

Como en casos anteriores estos autores utilizan un controlador de movimientos programado con la ayuda de códigos Matlab-Simulink y utilizan vehículos con células que registran las fuerzas ejercidas por los neumáticos en el pavimento y acelerómetros para verificar las fuerzas inerciales, registrar los movimientos y ajustar las velocidades y trayectorias del vehículo.

²⁶⁶ La utilización de algoritmos tipo Fuzzy para resolver problemas de enrutamiento y control del movimiento de vehículos automáticos es una clásica aproximación utilizada por diversos autores, entre otros: Sugeno y Nishida (1985), Song y Tau (1992), von Altrock *et al.* (1992a, 1992b), Pin y Watanabe (1993), Lee y Wang (1994), Makita *et al.* (1994), Yen y Pfluger (1995), Pradhana *et al.* (2009).

²⁶⁷ Para estos autores el vuelco es uno de los típicos problemas de los vehículos industriales que deben moverse con grandes cargas o en vacío, en un ambiente donde la carga a transportar puede ser variable y desconocida. Así, el vehículo debe ser estable en cualquier condición de trabajo cumpliendo además el objetivo de privilegiar la maniobrabilidad y el coste sin comprometer esta estabilidad.

Estos estudios en prototipo o modelo físico en AGV's también tienen como antecedentes desde el punto de vista computacional los modelos de simulación de movimientos y control de los mismos desarrollados por diversos autores a finales de los años 80 y principios de los 90.

Por citar algunos ejemplos significativos de autores de esta época que abordan el problema de enrutamiento de vehículos automáticos y desarrollo de algoritmos para evitar colisiones podrían destacarse a Krogh y Thorpe (1986); Shahidi (1989 y 1991); Tilove (1990); Chuang y Ahuja (1991); Koren y Borenstein (1991); Alexopoulos y Griffin (1992); Barraquand *et al.* (1992); y, Hwang y Ahuja (1992).

Este campo científico sigue avanzado en la década de los 2000 y penetra de lleno en el ámbito portuario y así, Ioannou *et al.* (2001), en un proyecto de colaboración entre la universidad (University of Southern California, California, Estados Unidos) con la empresa privada (August Design, Inc.) tratan de analizar como los AGV's pueden ayudar a mejorar la capacidad y eficiencia de terminales portuarias, para lo que utilizan un modelo de evaluación de rendimiento y coste. Este artículo resulta interesante en tanto que analiza la secuencia lógica que siguen este tipo de vehículos y como resuelven sus elementos de diseño más crítico (cruces de vehículos, sistemas de bloqueo y mecanismos para evitar colisiones, sistemas de control de tráfico, protocolos de intercambio electrónico de datos, etc...). Otras muchas referencias de modelos centrados en AGV's en terminales portuarias han sido descritos en el capítulo 2 de esta tesis que aquí sólo se cita para evitar duplicar lo allí comentado.

Sí se indicará, no obstante, como en la década de los 2010 se introducen nuevos conceptos, así Benmerikhi (2013) compara dos técnicas como son los clásicos AGV's con los nuevos IAV (*Intelligent Autonomous Vehicle*) incluyendo una interesante tabla de comparación donde hace destacar que, mientras que los AGV's presentan un operación automática desarrollada mediante rutas fijas y que requiere una infraestructura dada que se adapta dentro del sistema; los IAV se adaptan de manera flexible a cualquier infraestructura (no debe programarse en su sistema de control), tratándose de sistemas autónomos (*versus* automáticos) y sin necesidad de seguir rutas fijas (pues actúan inteligentemente). Como otras diferencias destaca que los IAV son esencialmente vehículos eléctricos (los AGV son típicamente diésel) y que los AGV son siempre sin conductor (mientras que un IAV puede no tener conductor, ser conducido remotamente o llevar conductor).

No es objeto de esta tesis profundizar en estos sistemas pero si se puede resaltar que es un campo de innegable potencial en cuanto su futura producción científica como respuesta a la demanda que genera la tendencia a automatización en diversos sectores (militares, agrícolas, industriales, de transporte, comercio o distribución, etc.). Efectivamente como pone de manifiesto Abdullah (2013) la introducción de robots se está implementando en escenarios diversos del mundo real y la investigación del control de movimiento de los mismos y sus interacciones con otros sistemas en un entorno dinámico están adquiriendo una gran relevancia.

3.8 Conclusiones.

Desde el punto de vista del paradigma computacional y dentro del sector portuario, los modelos DES son los primeros que se desarrollaron (cuentan con más de 50 años de recorrido) y de los que más ejemplos se ha encontrado en la labor de revisión de literatura científica en la que se enmarca la presente tesis doctoral. Efectivamente, el número de artículos y referencias de modelos ABS y SD es mucho más bajo que las realizadas bajo eventos discretos o DES.

Sin embargo, los modelos basados en paradigma ABS y SD en puertos están tomando cierta relevancia desde la década de los 2000 (modelos ABS) y 2010 (modelos SD).

Así, se ha demostrado como los sistemas ABS permiten reproducir fiel y eficazmente el comportamiento dinámico y complejo que se establece en una terminal de contenedores (especialmente en lo que se refiere a la interacción entre grúas y medios de manipulación terrestres) siendo idóneos también para plantear estudios de detalle operativo e incluso sistemas DSS implementados en tiempo real.

De igual modo, los SD se revelan como una herramienta útil cuando el enfoque y objetivos son más estratégicos que operativos, cuando el número de variables a considerar es muy alto, sus interdependencias muy complejas o su dinámica de evolución potencialmente alta; condiciones que concurren, por ejemplo, cuando se pretende realizar previsiones a muy largo plazo, en estudios de tipo “macro” o cuando se requiere un gran nivel de abstracción en base más a datos cualitativos que cuantitativos.

Así, los sistemas SD se han exportado con éxito a otras disciplinas portuarias de espectro más amplio como pueden ser las evaluaciones de impacto ambiental; evaluaciones de impacto económico del puerto y sus relaciones con su hinterland; valoración de riesgos y análisis de planes de contingencia; previsiones de tráfico y análisis globales de cadena de suministro, gestión de flota y logística de operaciones marítimo-portuarias.

En base a las referencias publicadas, en los modelos microscópicos las técnicas DES o ABS parecen encontrar un mejor campo de aplicación que los SD (aunque existen realizaciones específicas en esta área bajo este paradigma); siendo en opinión de algunos autores los modelos DES más adecuados que los ABS en modelos integrados que tratan de automatizar la totalidad de los elementos de una terminal. Esto es así debido al gran número de agentes y multitud de relaciones a tener en cuenta lo que hace que este tipo de modelos encuentren dificultades y restricciones computacionales en técnicas ABS que son más abordables con los métodos actuales mediante técnicas DES. El avance que en el tiempo de computación se experimenta día a día podría solventar en el futuro esta limitación.

Por el contrario, los modelos ABS han mostrado su potencialidad en la reproducción de la gestión de una terminal de contenedores en lo que se refiere a la gestión del patio y operaciones de transporte horizontal, cuando este enfoque aislado es el que interesa al modelizador. Su utilización está especialmente descrita cuando se trata de equipar la terminal con AGV's.

Desde el punto de vista de las herramientas hoy en día existen numerosas plataformas (comerciales o de código abierto) para poder abordar simulaciones en cualquiera de los paradigmas señalados, no existiendo barreras (más allá del coste de uno u otro software) para la implantación de estos sistemas.

Por último, en los últimos años se han introducido en el campo portuario modelos de gestión de terminales a tiempo real (TOS) que actúan en la “vida real” del puerto (bien configurándose como DSS en los que se apoya el gestor portuario a la hora de tomar sus decisiones, bien como herramienta de control real de las operaciones dando instrucciones directas al equipamiento en el caso de las terminales automatizadas).

Estos TOS se pueden utilizar también en proyectos de emulación en los que el software es real pero la gestión de la terminal es simulada. El objetivo de un ejercicio de emulación es verificar cuan adecuado es el TOS antes de su implementación en una terminal real o realizar ajustes o mejoras sobre uno ya existente.

Como campo de reciente aparición en el ámbito de la gestión de operaciones se encuentran los modelos físicos (*prototyping*), campo en el que se vislumbra en un futuro un alto potencial conforme están avanzando las tecnologías wireless y la robótica. Estos dos últimos aspectos, junto con el coste asociado a este tipo de desarrollos, han introducido una histórica limitación para un mayor desarrollo de este subsector que contrasta con el alto grado de implantación de este tipo de técnicas en el afín campo de la ingeniería portuaria (modelos físicos para el dimensionamiento de infraestructuras portuarias: dique, muelles y configuraciones o lay-out).

Bibliografía.

1. Abdel-Fattah, A.K.; El-Tawil, A.B. y Harraz, N.A. (2013). *An Integrated Operational Research and System Dynamics Approach for Planning Decisions in Container Terminals*. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, vol.7 (10), pp: 908-914.(Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://waset.org/publications/17095/an-integrated-operational-research-and-system-dynamics-approach-for-planning-decisions-in-container-terminals>)
2. Abdullah, M. (2013). *Mobile robot navigation using potential fields and market based optimizacion*. Department of Technology, Örebro University (Örebro, Suecia). 111 páginas. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:628458/FULLTEXT01.pdf>
3. Adams, M.D. (1989). *A layered Control System for a mobile robot*. Technical Report, Oxford University, Robotics Research Group. Oxford (Reino Unido).
4. Adams, M.D.; HU, H. y Probert, P.J. (1990). *Towards a realtime architecture for obstacle avoidance and path planning in mobile robots*. Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volumen 1. pp. 584-589. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] <https://cswww.essex.ac.uk/staff/hhu/Papers/IEEE-ICRA-1990-584-589.pdf>
5. Agerschou, H.; Lundgren, H.; Sörensen, T.; Ernst, T.; Korsgaard, J.; Schmidt, L. R. y Chi. W. K. (1983). *Planning and Design of Ports and Marine Terminals*. John Wiley and Sons, Chichester. ISBN-13: 978-0727734983 y ISBN-10: 0727734989. 464 páginas.
6. Aleman, D., Wibisono, T. y Schwartz, B. 2009. *Accounting for Individual Behavior and Demographics in Pandemic Disease Modeling*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (Editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin y R. G. Ingalls), Wiley-IEEE Press, pp. 86-98. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/224124116_Accounting_for_individual_behaviors_in_a_pandemic_disease_spread_model

7. Alexopoulos, C. y Griffin, P.M.(1992). *Path planning for a mobile robot*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 22(2): 318-322. Disponible en [fecha de consulta 08.05.2017] DOI: [10.1109/21.148404](https://doi.org/10.1109/21.148404)
8. Allan, R. (2010). *Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools*. Computational Science and Engineering Department, Version 1.1. STFC Daresbury Laboratory, Daresbury, Warrington WA4 4AD (Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso el 07.01.2017] <http://www.grids.ac.uk/Complex/ABMS/>
9. An, L. (2012). *Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models*. Ecological Modelling. Vol. 229, pp: 25–36. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010>
10. Angeloudis, P y Bell, M.G.H. (2009). *An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol 46(3): 354–366.
11. Angeloudis, P. y Bell, M.G H. (2010). *Stack operation uncertainty in automated container terminals: Effects, challenges and control techniques*. IAME, 7–9 de Julio de 2010, Lisboa (Portugal).
12. Angeloudis, P. y Bell, M.G.H.. (2011). *A review of container terminal simulation models*. Maritime Policy & Management, vol 38(5), pp: . Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2011.597448>
13. ANYLOGIC (2016). *Multimethod Simulation Software: The only simulation tool that supports Discrete Event, Agent Based, and System Dynamics Simulation*. The Analogyc Company. San Petesburgo (Rusia). Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] <http://www.anylogic.com/>
14. Ascape (2010). *Ascape Guide*. Ascape on Sourceforge. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://ascape.sourceforge.net/>
15. Auchincloss, A.H. y Diez Roux A.V. (2008). *A new tool for epidemiology: The usefulness of dynamic-agent models in understanding place effects on health*. American Journal of Epidemiology, vol 168(1), pp: 1–8. Disponible en [fecha de acceso el 01.11.2016] <http://www.med.mcgill.ca/epidemiology/courses/EPIB654/Summer2010/Modeling/agent%20based%20simulation.pdf>
16. Awais, S.A. y Milants, J. (2009). *Agent based simulation for C-AGVs at Intermodal Terminal*. Master Thesis en Computer Science. School of Computing. Blekinge Institute of Technology - Soft Center, Ronneby (Suecia). 93 Páginas. Disponible en [fecha de

-
- acceso el 21.02.2017] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:828294/FULLTEXT01.pdf>
17. Baker, P. y Canessa, M. (2009). *Warehouse design: A structured approach*. European Journal of Operational Research, vol 193 (2): 425–436. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.045>
 18. Bakht, S.S. y Ahmad, Q.S. (2008). *A Multi Agent Web Based Simulation Model for Evaluating Container Terminal Management*. Master Thersis - Computer Science MCS 2088:33 (Agosto 2008) Blekinge Institute of Technology (Ronneby, Suecia). Disponible en [fecha de acceso el 23.02.2017] http://www.academia.edu/4963840/A_Multi_Agent_Web_Based_Simulation_Model_f_or_Evaluating_Container_Terminal_Management
 19. Balbi, S.; Giupponi, C.; Perez, P. y Alberti, M. (2013). *A Spatial Agent-Based Model for Assessing Strategies of Adaptation to Climate and Tourism Demand Changes in an Alpine Tourism Destination*. Environmental Modeling & Software vol 45, pp: 29–51. Disponible en [fecha de acceso el 01.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.004>
 20. Barraquand, J.; Langlois, B. y Latobe, J.-C. (1992). *Numerical potential filed techniques for robot path planning*. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 22(2): 224–241. Disponible en [fecha de consulta 08.05.2017] https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp_papers/l/BLL92.pdf
 21. Bass, F.M. (1969). *A new product growth model for consumer durables*. Management Science, vol. 15, pp: 215–227. Doi: 10.1287/mnsc.15.5.215 Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.uvm.edu/~pdodds/teaching/courses/2009-08UVM-300/docs/others/everything/bass1969a.pdf>
 22. Bedau, M.A. (2003). *Artificial life: Organization, adaptation, and complexity from the bottom up*. Trends in Cognitive Science vol 7(11), pp: 505–512. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://people.reed.edu/~mab/publications/papers/BedauTICS03.pdf>
 23. Benmerikhi, M. (2013). *Future ports to benefit from Intelligent Autonomous Technology*. World Port Development - International Journal for Port Management., April 2013 CI Media Ltd (Maidenhead, Berkshire, Inglaterra). Disponible en [fecha de acceso el 10.05.2017] http://www.intrade-nwe.eu/_images/lespdf/world-port-development-04-2013.pdf

24. Bernhardt, K.L.S. (2013). *Agent-based modeling in transportation*. 70 Transportation Research Circular E-C113: Artificial Intelligence in Transportation, pp: 72–80. Disponible en [fecha de acceso el 15.10.2016] <https://www.nap.edu/read/23208/chapter/11#82>
25. Bielli, M.; Boulmakoul, A. y Rida M. (2006). *Object oriented model for container terminal distributed simulation*. European Journal of Operational Research vol.175, pp: 1731–1751. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://202.114.89.60/resource/pdf/1871.pdf>
26. Bin, L.; Wenfeng, L. y Yu, Z. (2008). *Agent-based modeling and simulation for vehicle dispatching at container terminals*. Journal of System Simulation, vol 20 (2008), pp: 5158-5161. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/291916353_Agent-based_modeling_and_simulation_for_vehicle_dispatching_at_container_terminals
27. Bin, L.; Wen-Feng, L. y Yu, Z. (2009). *Study on Modeling of Container Terminal Logistics System Using Agent-Based Computing and Knowledge Discovery*. International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 5(1), pp: 36-36. Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 1550-1329 Print/1550-1477 Online.DOI: 10.1080/15501320802524029. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <https://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2009/251681/abs/>
28. Bischoff, E.E. (2006). *Three dimensional packing of items with limited load bearing strength*. European Journal of Operational Research, vol. 168, pp: 952–966. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.037>
29. Boer, C. A. y Saanen, Y. (2008). *Controls: Emulation to improve the performance of container terminals*. Proceedings of the 40th Winter Simulation. Winter Simulation Conference, 7–10 de diciembre de 2008, Miami (Estados Unidos). (Editado por S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler) . Disponible en [fecha de acceso el 12.03.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc08papers/332.pdf>
30. Bookstaber, R. (2012). *Using agent-based models for analyzing threats to financial stability*. Working Paper nº 3 (21 diciembre 2012). Office of Financial Research - U.S. Department Treasury. Washington, D.C. (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 12.03.2017] https://www.treasury.gov/initiatives/ofr/research/Documents/OFR_Working_Paper_No_3_ABM_Bookstaber_Final.pdf

-
31. Borshchev, A. y Filippov, A. (2004). *From System Dynamics and Discrete Event to practical Agent Based Modelling: Reasons, Techniques, Tools*. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Oxford (England). Disponible en [fecha de acceso el 22/10/2016] <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/systemdyndiscreteeventabmcompared.borshchevfilippov04.pdf> y http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004/PAPERS/381BORSH.pdf
32. Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America: Lisle, Illinois (Estados Unidos). 614 páginas. ISBN: 978-0-9895731-7-7 Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www.anylogic.com/big-book-of-simulation-modeling>
33. Bortfeldt, A. y Gehring, H. (1998). *Ein Tabu Search-Verfahren für Containerbeladeprobleme mit schwach heterogenem Kistenvorrat*. Operations Research Spektrum vol. 20, pp: 237–250. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/251338363_Ein_Tabu_Search-Verfahren_fur_Containerbeladeprobleme_mit_schwach_heterogenem_Kistenvorrat
34. Bortfeldt, A. y Gehring, H. (2001). *A Hybrid Genetic Algorithm for the Container Loading Problem*. European Journal of Operational Research vol. 131(1), pp: 143–161. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/223079635_Hybrid_genetic_algorithm_for_the_container_loading_problem
35. Bortfeldt, A.; Gehring, H. y Mack, D. (2003). *A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem*. Parallel Computing, vol. 29 (5), pp: 641–662. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222406193_A_parallel_tabu_search_algorithm_for_solving_the_container_loading_problem
36. Bortfeldt, A. y Wäscher, G. (2012). *Container loading problem – A state-of-the-art review*. Working Paper n°7/2012. Faculty of Economics and Management. Otto Van Guericke Universität Magdeburg. 47 págnas. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] http://www.fww.ovgu.de/fww_media/femm/femm_2012/2012_07-EGOTEC-503ec3895182dc0d922a6bd7feebb3a5.pdf
37. Bortfeldt, A. y Wäscher, G. (2013). *Constraints in container loading – A state-of-the-art review*. European Journal of Operational Research, vol 229(1), pp: 1–20. Disponible en

- [fecha de acceso el 28.01.2017]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171200937X>
38. Böse, J.W. (2011). *Handbook of Terminal Planning*. Springer (editado el 09/03/2011) 433 páginas. ISBN-10: 1441984070, ISBN-13: 978-1441984074.
 39. Bontempi, G.; Gambardella, L.M. y Rizzoli, A.E. (1997). *Simulation and optimisation for management of intermodal terminals*. ESM'97, Istanbul. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/2887472_Simulation_And_Optimisation_For_Management_Of
 40. Borovits, I. y Ein-dor, P. (1975). *Computer simulation of a seaport container terminal*. Simulation, vol 25(2), pp: 141–144.
 41. Breitenecker, F.; Bicher, M. y Wurzer, G. (2015). *Agent-Based Simulation in Archaeology: A Characterization*. Incluido en: *Agent-based Modeling and Simulation in Archaeology*, pp.53-76 Springer: New York. 978 ISBN -3-319-00007-7. 269 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 01.11.2016]
<http://www.springer.com/cn/book/9783319000077>
 42. Briano, E.; Caballini, C.; Mosca, M. y Revetria, R. (2008). *Modelling of Voltri Terminal Europe in Genoa Using System Dynamic Model Simulation*. Proceedings of the 7th System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE'08), Venecia (Italia), 21-23 de Noviembre de 2008, pp: 411-417. ISBN: 978-960-474-027-7. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016)
https://www.researchgate.net/publication/261857932_Modelling_of_Voltri_terminal_Europe_in_Genoa_using_system_dynamic_model_simulation
 43. Briano, E.; Caballini, C.; Mosca, M. y Revetria, R. (2009). *A system dynamics decision cockpit for a container terminal: The case of Voltri Terminal Europe*. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. vol. 3(2), pp: 55-64. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) <http://www.naun.org/main/NAUN/mcs/mcs-108.pdf>
 44. Brooks, R.A. (1982). *Solving the find-path problem by good representation of free space*. Proceedings of the 2nd National Conference on Artificial Intelligence (pp: 381-386), Pittsburgh (Pensilvania, Estados Unidos). ISBN 978-1-57735-192-4 (456 páginas) Disponible en [fecha de consulta 08.05.2017]
<http://www.aaai.org/Papers/AAAI/1982/AAAI82-091.pdf>

-
45. Brooks, R.A. (1983) *Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space*. Robotics and Automation, Volumen 13 (2): 190-197. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: [10.1109/TSMC.1983.6313112](https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313112)
46. Brooks, R.A. (1984). *Aspects of mobile robot visual map making*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics Research. 20-23 Agosto de 1984, Kyoto (Japón)
47. Brooks, R.A. (1985). *Aspects of mobile robot visual map making*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volumen 2, pp: 824 - 829 Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: [10.1109/ROBOT.1985.1087348](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1985.1087348).
48. Brooks, R.A. (1986). *A robust layered Control System for a Mobile Robot*. Journal of Robotics and Automatation, vol 2(1): 14-23. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] <http://www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/lari/papers/Brooks86RobustLayeredControl.pdf>
49. Bruzzone, A. y Signorile, R. (1998). *Simulation and genetic algorithms for ship planning and shipyard layout*. SIMULATION vol. 71(2), pp: 74-83. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220164632_Simulation_and_Genetic_Algorithms_for_Ship_Planning_and_Shipyard_Layout
50. Bruzzone, A.; Giribone, P. y Revetria, R. (1999). *Operative requirements and advances for the new generation simulator in multimodal container terminal*. Proceedings of the 31st Winter Simulation Conference. Phoenix, Arizona (Estados Unidos) vol 2 , pp: 1243-1252. doi>10.1145/324898.325049.
51. Buchheit, M.; Kuhn, N.; Müller, J.P. y Pischel, M. (1992). *MARS: Modeling a Multiagent scenario for shipping companies*. Proceedings of the European Simulation Symposium (ESS-92), Society for Computer Simulation (SCS), Dresden (Alemania) (1992), pp.302-306.
52. Bugaric, U. y Petrovic, D. (2007). *Increasing the capacity of terminal for bulk cargo unloading*. Simulation Modelling Practice and Theory vol.15(10), pp: 1366-1381. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X07001165>
53. Caballini, C.; Sacone, S. y Siri, S. (2012). *The port as a system of systems: a System Dynamics simulation approach*. 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 2012, pp: 411-417. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]

- https://www.researchgate.net/profile/Silvia_Siri/publication/261152517_The_port_as_a_system_of_systems_A_System_Dynamics_simulation_approach/links/5461d8340cf27487b4530d29?ev=pub_int_doc_dl&origin=publication_detail&inViewer=true
54. Cao, Y. (2009). *System Dynamics Analysis On Socio-Economic Impact Of Coal Port Construction Projects*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189360272486327>
 55. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014a). *Storage yard operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions*. European Journal Operational Research 235(2), pp: 412–430. ©. Disponible en [fecha de acceso el 04.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713008771>
 56. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014b) *Transport operations in container terminals: literature overview, trends, research directions and classification scheme*. European Journal Operational Research 236, pp: 1–13. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 04.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/260556440_Transport_operations_in_container_terminals_Literature_overview_trends_research_directions_and_classification_scheme
 57. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2015). *Seaside Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions*. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 27(2-3), pp: 224-262. Borrador disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10696-013-9178-3>.
 58. Carlucci, F. y Cira, A. (2009). *Modelling a plan for seaport investments through a system dynamics approach*. Pomorstvo, vol. 23(2), pp. 405–425. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/266272688_Modeling_a_plan_for_seaport_investments_through_a_system_dynamics_approach
 59. Cartenì, A. y de Luca, S. (2009a). *Simulation of a container terminal through a discrete event approach: Literature review and guidelines for application*. Association for European Transport. *AET 2009: European Transport Conference*, (5-7 de Octubre de 2009). Noordwijkerhout (Holanda). 21 páginas. ISBN 978-1-905701-04-9. Disponible en [fecha de acceso el 17.01.2017] abstracts.aetransport.org/paper/download/id/3148.
 60. Cartenì, A. y De Luca, S. (2012). *Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 21, pp: 123-145. Disponible en [fecha de acceso el

24.10.2016]

https://www.researchgate.net/publication/220674619_Tactical_and_strategic_planning_for_a_container_terminal_Modelling_issues_within_a_discrete_event_simulation_approach

61. Caserta, M.; Schwarze, S y Voß, S. (2011). *Container Rehandling at Maritime Container Terminals*. Capítulo 13 del libro “*Handbook of Terminal Planning*” Springer-Verlag New York (Editado por Jürgen W. Böse). ISBN978-1-4419-8407-4. 433 páginas.
62. Cegielski, W.H. y Rogers, J.D. (2016). *Rethinking the role of agent-based modeling in archaeology*. Journal of Anthropological Archaeology, vol 41(March-2016), pp: 283–298. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaa.2016.01.009>
63. Charania, A. C., Olds, J.R. y DePasquale, D. (2006) *Sub-Orbital Space Tourism Market: Predictions of the Future Marketplace Using Agent-Based Modeling*. SpaceWorks Engineering, Inc., Atlanta, GA. 57th International Astronautical Congress (IAC’2006), 2-6 de Octubre de 2006, Valencia (España) Disponible en [fecha de consulta 21.02.2017] <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.IAC-06-E3.4.01>
64. Chen, L. (2012). *Agent-based modeling in urban and architectural research: A brief literature review* Frontiers of Architectural Research. Vol 1(2), pp: 166–177. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/257737450_Agent-based_modeling_in_urban_and_architectural_research_A_brief_literature_review
65. Chen, J., Taylor, J.E. y Wei, H.-H. (2012). *Modeling Building Occupant Network Energy Consumption Decision-making: The Interplay Between Network Structure and Conservation*. Energy and Buildings. Volumen 47(2012), pp: 515–524. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.026>
66. Chen, X.; Ong, Y.-S.; Tan, P.-S.; Zhang, N. y Li, Z. (2013). *Agent-based modeling and simulation for supply chain risk management—A survey of the state-of-the-art*. Proceedigins of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Manchester (Reino Unido), pp: 1294–1299. Disponible en [fecha de acceso el 15.03.2017] https://www.researchgate.net/publication/258512343_Agent-Based_Modeling_and_Simulation_for_Supply_Chain_Risk_Management_-_A_Survey_of_the_State-of-the-Art
67. Cheng, J. K., Tahar, R. M., & Ang, C.-L. (2010). *Understanding the Complexity of Container Terminal Operation Through the Development of System Dynamics Model*.

- International Journal of Shipping and Transport Logistics, vol. 2(4), pp: 429-443. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) <http://dx.doi.org/10.1504/IJSTL.2010.035503>
68. Chincholkar, A.K. y Krishnaiah Chetty, O.V. (1996). *Simultaneous optimisation of control factors in automated storage and retrieval systems and FMS using stochastic coloured Petri nets and the Taguchi method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.12(2): 137—144. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] DOI: 10.1007/BF01178954
 69. Chincholkar, A.K., Krishnaiah Chetty, O.V. y Kuppuswamy, G. (1994). *Analysis of an automated storage and retrieval system using stochastic coloured Petri Nets*. Advances in Modelling & Analysis, part C , vol. 44(3): 19-30. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/294201016_Analysis_of_an_automated_storage_and_retrieval_system_using_Stochastic_coloured_Petri_nets
 70. Choi, Y.S. y Yun, W.Y. (2000). *Simulator for Port Container Terminal Using an Object-Oriented Approach*. Report, Brain Korea 21 Logistics Team. Industrial Engineering/Pusan National University. Disponible en [fecha de acceso el 12.02.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/56bc/08cb17ffbd6a62f77316586562b9182786e6.pdf>
 71. Choi, H. R; B. Park, D. Yoo y M. Kang (2007). *A Study on System Dynamics Modelling to Strengthen the Competitiveness of a Container Terminal*. Proceedings of the 2007 WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications, Gold Coast (Australia), 17-19 de enero 2007. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007australia/papers/550-432.pdf>
 72. Chuang, J.-H. y Ahuja, N. (1991). *Path planning using the Newtonian potential*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volume1 1, pp: 558-563. Disponible en [fecha de consulta 08.05.2017] http://vision.ai.illinois.edu/publications/path_planning_ICRA_1991.pdf
 73. Chung, Y. C.; Randhawa, S. U. y McDowell, E. D. (1988). *A simulation analysis for a transtainer-based container handling facility*. Computers and Industrial Engineering, vol 14 (2), pp:113-125. Disponible en [fecha de acceso el 20.03.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360835288900204>
 74. Collier, P. I. (1980). *Simulation as an aid to the study of a port as a system*. Computer Application in Shipping and Shipbuilding, vol. 7, pp: 51-56.

-
75. Collier, N.; Howe, T., y North, M. J. (2003). *Onward and upward: The transition to Repast 2.0*. Proceedings of the 1st Annual North American Association for Computational Social and Organizational Science Conference. (Pittsburgh, PA Estados Unidos), North American Association for Computational Social and Organizational Science. pp: 1-6. Disponible en [fecha de acceso el 12.12.2016] https://www.researchgate.net/publication/228958695_Onward_and_upward_The_transition_to_Repast_20
76. Cortés , P.; Muñuzuri , J.; Ibáñez, J.N. y Guadix, J. (2007). *Simulation of freight traffic in the Seville inland port*. Simulation Modelling Practice and Theory . Volumen 15(3), pp: 256–271. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://io.us.es/componentes/P.Cortes/pdfs/Sim_freight_Seville_inland_Port.pdf
77. Conway, S. R. (2006). *An Agent-Based Model for Analyzing Control Policies and the Dynamic Service-Time Performance of a Capacity-Constrained Air Traffic Management Facility*. Proceedings of ICAS 2006 – 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. 3-8 de Septiembre de 2006, Hamburgo (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 25.03.2017] http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2006/PAPERS/564.PDF
78. Cranefield, S.; Jarquin, R.; Li, G.; Martin, B. Unlan, R.; Wagner, H.-F.; Winikoff, M. y Young, T. (2011). *Agent-Based Container Terminal Optimisation (Extended Abstract)*. Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011), Extended Paper R-24, Session R, pp: 1113-1114. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <http://www.aamas-conference.org/Proceedings/aamas2011/papers/R24.pdf>
79. Crooks, A.; Castle, C. y Batty, M. (2008). *Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation*. Computers, Environment and Urban Systems vol 32(6), pp: 417–430. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.004>
80. Crooks, A.T. y Heppenstall, A.J. (2012). *Introduction to agent-based modelling*. Incluido en Agent-Based Models of Geographical Systems. ISBN: 978-90-481-8926-7 (A.J. Heppenstall, A.T. Crooks, L.M. See y M. Batty (eds). Springer: New York, pp: 85–108. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://www.springer.com/us/book/9789048189267>
81. Crooks, A.T. y Wise, S. (2013). *GIS and agent-based models for humanitarian assistance*. Computers, Environment and Urban Systems, vol 41 (septiembre 2013), pp:

- 100–111. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.05.003>
82. Croope, S.V. y McNeil, S. (2011). *Improving Resilience of Critical Infrastructure Systems Postdisaster*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol 2234, pp: 3–13. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.3141/2234-01>
83. Cui, J.X. (2007). *A Study Of Yangtze River Delta Port Group Logistics System Based On System Dynamics Developing In Correspond*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017]
<http://www.globethesis.com/?t=2189360212455725>
84. Dai, X.J. (2012). *The Port Development Research Based On Hinterland's Economy And Competition And Cooperation Among Port Group*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017]
<http://www.globethesis.com/?t=2249330362968023>
85. Dalziell, E. P., y McManus, S.T. (2004). *Resilience, Vulnerability, and Adaptive Capacity: Implications for System Performance*. International Forum for Engineering Decision Making (IFED). Stoos Switzerland. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/2809>
86. Davidsson, P. y Johansson, S (2002). *Evaluating Multi-Agent System Architectures: A case study concerning dynamic resource allocation, Third International Workshop on Engineering Societies in the Agents' World*, Madrid, España (2002). 13 páginas Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016].
https://www.researchgate.net/publication/2852838_Evaluating_Multi-agent_System_Architectures_A_Case_Study_Concerning_Dynamic_Resource_Allocation
87. Davidsson, P.; Johansson, S.; Persson, J. y Wernstedt, F. (2003). *Agent-based approaches and classical optimization techniques for dynamic distributed resource allocation: A preliminary study*. AAMAS'03 workshop on Representations and Approaches for Time-Critical Decentralized. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]. 4 páginas.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.8.3843&rep=rep1&type=pdf>
88. Davidsson, P., Henesey, L. E., Ramstedt, L., Törnquist, J., y Wernstedt, F., (2005a). *Agent-Based Approaches to Transport Logistics*. Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation: Whitestein Series in Software Agent Technologies, pp: 1-15 (Bazzan, Ana; Klügl, Franziska; Ossowski, Sascha). Editado por Birkhäuser. 10.1007/3-

-
- 7643-7363-6_1. ISBN 978-3-7643-7258-3. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-7643-7363-6_1
89. Davidsson, P.; Henesey, L. E.; Ramstedt, L.; Törnquist, J. y Wernstedt, F. (2005b). *Agent-Based Approaches to Transport Logistics*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol 13(4), pp: 255-271. DOI: 10.1016/j.trc.2005.07.002. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/222649741_Agent-Based_Approaches_to_Transport_Logistics
 90. Davies, A.P. y Bischoff, E.E. (1999). *Weight distribution considerations in container loading*. Working Paper, European Business Management School, Statistics and OR Group, University of Wales, Swansea (1998). Posteriormente publicado en European Journal of Operational Research vol 114, pp: 509–527. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00139-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00139-8)
 91. de Koster, R. B. M., Le-Duc, T. y Roodbergen, K.J. (2007). *Design and control of warehouse order picking: A literature review*. European Journal of Operational Research, vol 182 (2): 481–501. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://www.roodbergen.com/publications/EJOR2007.pdf>
 92. de Koster, R. B. M., Le-Duc, T. y Yugang, Y. (2008). *Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS*. International Journal of Production Research, vol 46 (6): 1495–1514. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00512947/document>
 93. de la Peña, I. (2006). *Ensayos Físicos para el Dimensionamiento Estructural del Manto de un dique de abrigo: Teoría y Aplicación Práctica*. Trabajo titulado para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados. Universidad de A Coruña (A Coruña, España). 73 Páginas.
 94. de la Peña, I. (2011). *Por of Ferrol enlargement Works*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, vol 164 (MA2): 49–58. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017]. doi: 10.1680/maen.2011.164.2.49
 95. Degano, C. y Pellegrino, A. (2002). *Multi-Agent Coordination and Collaboration for Control and Optimization Strategies in an Intermodal Container Terminal*. Proceedings of the IEEE International Engineering Management Conference (IEMC-2002), 18-20 de Agosto de 2002 Cambridge, Reino Unido. Vol 2. DOI: 10.1109/IEMC.2002.1038502. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 17.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/3970611_Multi-

agent coordination and collaboration for control and optimization strategies in an intermodal container terminal

96. Dekker, T.C. y de Jong, A.J. (1989). *Concentratie van de overslag van binnenvaartcontainers in de haven van Rotterdam*. Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, Rotterdam (Holanda).
97. Deng, J.-L. (1982). *Control problems of grey systems*. Systems & Control Letters, 1(5), pp: 288–294. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017]. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6911\(82\)80025-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X)
98. Dooly, D.R. y Lee, H.F. (2008). *A shift-based sequencing method for twin-shuttle automated storage and retrieval systems*. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers), vol 40(6): 586–594. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/07408170701730776>
99. Douma, A.M.; Schuur, P.C. y Schutten, J.M.J. (2007). *Barge rotation planning and quay scheduling in the port of Rotterdam*. Universidad de Twente (Holanda) - Beta working paper WP-217. 32 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] <https://core.ac.uk/download/pdf/11473731.pdf>
100. Douma, A.M. (2008): *Aligning the operations of barges and terminals through distributed planning*. Ph.D. thesis, Operations Management and Logistics (Departamentos de Technology Management, and Mathematics and Computing Science (Universidad de Eindhoven) y Centre for Telematics and Information Technology (Universidad de Twente)), Diciembre 2008. 255 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] http://doc.utwente.nl/60220/1/thesis_Douma%2C_Albert.pdf
101. Douma, A.M. ; Schutten, J.M.J. y Schuur, P.C. (2009). *Waiting profiles: an efficient protocol for enabling distributed planning of container barge rotations along terminals in the Port of Rotterdam*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol 17(2): 133–148. Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] <http://doi.org/10.1016/j.trc.2008.06.003>
102. Douma, A.M.; Schuur, P.C. y Schutten, J.M.J. (2011). *Aligning barge and terminal operations using service-time profiles*. Flexible Services and Manufacturing Journal, vol 23(4): 385–421. Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] <http://doc.utwente.nl/76946/1/aligning.pdf>
103. Douma, A.M., van Hillegersberg, J. y Schuur, P. (2012) *Design and evaluation of a simulation game to introduce a multi-agent system for barge handling in a seaport*.

-
- Decision support systems, 53 (3): 465 - 472. ISSN 0167-9236 Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] <http://doc.utwente.nl/79921/4/Douma12design.pdf>
104. Duinkerken, M.B.; Nuttall, A.J.G.; Ottjes, J.A. y Lodewijks, G. (2005). *Developing an AGV motion controller using simulation, emulation and prototyping*. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. Las Vegas, Nevada (Estados Unidos), pp: 396-399. ISBN: 0-7803-8961-1. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.03.2017] <http://wbmttt.tudelft.nl/users/duinkerker/papers/las0506.pdf>
 105. Duinkerken, M. B.; Ottjes, J. A. y Lodewijks, G. (2006). *Comparison of routing strategies for AGV systems using simulation*. Proceedings of Winter Simulation Conference, 3–6 de diciembre de 2006. Monterey, California (Estados Unidos). Editado por L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol, y R. M. Fujimoto. , pp: 1524-1530. Disponible en [fecha de acceso el 24.03.2017] <http://informatics-sim.org/wsc06papers/193.pdf>
 106. Dundovic, C.; Bilic , M. y Dvornik, J. (2009). *Contribution to the development of a simulation model for seaport in specific operating conditions*. Promet – Traffic&Transportation, Vol. 21(5), pp: 331-340. Disponible en [fecha de acceso el 15.02.2017] www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/248/153
 107. Dvornik, J.; Munitic, A. y Bilic, M. (2006). *Simulation modelling and heuristic optimization of material flow of the port cargo system*. Promet- Traffic&Transportation, Vol. 18(2), pp: 123-135. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/298579491_Simulation_Modelling_and_Heuristics_Optimization_of_Material_Flow_of_the_Port_Cargo_System
 108. Egeblad, J.; Garavelli, C.; Lisi, L. y Pisinger, D. (2010). *Heuristic for container loading of furniture*. European Journal of Operational Research, vol 200 (3), pp: 881-892. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.048>
 109. Ekren, B.Y. y Heragu, S.S. (2011). *Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol.19 (7): 1640-1650. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.02.008>
 110. Ekren, B.Y. y Heragu, S.S., Krishnamurthy A. y Malmberg, C.J. (2013). *An approximate solution for semi-open queueing network model of an autonomous vehicle storage and retrieval system*. Transactions on Automation Science and Engineering, vol.10 (1): 205-215. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03-05-2017]

https://www.researchgate.net/publication/260662553_An_Approximate_Solution_for_Semi-Open_Queueing_Network_Model_of_an_Autonomous_Vehicle_Storage_and_Retrieval_System

111. Ekren, B.Y. y Heragu, S.S., Krishnamurthy A. y Malmborg, C.J. (2014). *Matrix-geometric solution for semi-open queueing network model of autonomous vehicle storage and retrieval system*, Computers & Industrial Engineering, vol.68 (1):78-86. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.002>
112. El Sheikh, A.S.R.; Paul R.Y., Harding, A.S. y Balmer, D. W. (1987). *A microcomputer-based simulation study of a port*. The Journal of the Operational Research Society, Vol. 38(8), Current Simulation Research (Aug., 1987), pp. 673-681. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.jstor.org/stable/2582839?seq=1#page_scan_tab_contents
113. Eley, M. (2002). *Solving Container Loading Problems by Block Arrangement*. European Journal of Operational Research, vol 141(2), pp: 393–409. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00133-9. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00133-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00133-9)
114. Eley, M. (2003). *A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem*. OR Spectrum vol 25 (1), pp: 54–60. (2003). Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] <https://link.springer.com/article/10.1007/s002910200113>
115. Engelen, S.; Meersman, H. y Voorde, E.V. (2006). *Using System Dynamics in Maritime Economics: an Endogenous Decision Model for Shipowners in the Dry Bulk Sector*. Maritime Policy and Management, vol. 33(2), pp: 141-158. DOI: 10.1080/03088830600612807. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088830600612807>
116. Engelen, S.; Dullaert, W. y Vernimmen, B. (2009). *Market Efficiency within Dry Bulk Markets in the Short Run: a Multi-agent System Dynamics Nash Equilibrium*". Maritime Policy and Management, vol 36(5), pp: 385-396. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088830903187135>
117. Epstein, J.M. (2009). *Modelling to contain pandemics*. Nature, vol 460(6), pp: 687. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] <http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7256/full/460687a.html>
118. Fang, Z.; Qi, Y.; Hao, J. y Huang, J. (2014). *Agent-Based Simulation Analysis on the Effect of an LNG Terminal on a Port Transport System*. 14th COTA International

-
- Conference of Transportation Professionals. American Society of Civil Engineers (ASCE Library) [fecha de último acceso el 15.10.2016] <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784413623.014#sthash.Z75wzDuQ.dpuf>
119. Fanslau, T. y Bortfeldt, A. (2010). *A Tree Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. INFORMS Journal on Computing, vol 22(2), pp: 222–235. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <https://www.fernuni-hagen.de/wirtschaftswissenschaft/download/beitraege/db426.pdf>
 120. Farmer, J.D. y Foley, D. (2009). *The economy needs agent-based modeling*. Nature: The weekly journal of science. vol 460 (7256), pp: 685–686. . Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7256/full/460685a.html>
 121. Fiorello, D.; Fermi, F. y Bielanska, D. (2010). *The ASTRA Model for Strategic Assessment of transport Policies*. System Dynamics Review vol 26 (3), pp: 283-290. Disponible en (fecha de acceso el 26.10.2016) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sdr.452/abstract>
 122. Fischer, K. y Khun, N. (1993). *A DAI approach to Modelling the Transport Domain*. © Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Int. DFKI – Research Report RR 93-25 (91 páginas). Disponible en (fecha de acceso el 26.10.2016) http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/3697/pdf/RR_93_25.pdf
 123. Fleming, M.; Huynh, N. y Xie, Y. (2013). *Agent-Based Simulation Tool for Evaluating Pooled Queue Performance at Marine Container Terminals*. Journal of the Transportation Research Board - Marine Transportation and Terminal Operations 2013, vol 2330: 103-112. ISBN: 9780309263313. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 26.04.2017] <http://docs.trb.org/prp/13-2936.pdf>
 124. Folcik, V. A., An, G.C. y Orosz, C.G. (2007). *The Basic Immune Simulator: An Agent-Based Model to Study the Interactions between Innate and Adaptive Immunity*. Theoretical Biology and Medical Modelling, vol 4(39). Disponible en [fecha de acceso el 12.03.2017] link.springer.com/content/pdf/10.1186/1742-4682-4-39.pdf
 125. Forrester, J.W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press. 479 Páginas. ISBN-10:0262060035, ISBN-13:978-0262060035.
 126. Forrester, J.W. (1971). *World Dynamics*. Cambridge, Mass. Wright-Allen Press (consultado en edición 1973) (2ª edición revisada de 1979). ISBN 0262560186, ISBN13: 9780262560184). 144 páginas.

127. Forrester, J.W.: (1975). *Collected Papers of Jay Forrester*. Pegasus Communications (ISBN 1883823374, ISBN13: 978-1883823375) 284 páginas.
128. Forrester, J.W.: (1996). *The begining of System Dynamics*. Conferencia en la reunión internacional de la System Dynamic Society de 1989. Editado por Forrester en 1996 y Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] en <http://web.mit.edu/sysdyn/sd-intro/D-4165-1.pdf>
129. Frankel, E. (1987). *Port Planning and Development*. John Wiley & Sons Inc (30 de abril de 1987). 822 Páginas. ISBN-10: 0471837083 y ISBN-13: 978-0471837084
130. Frazelle. E.H. (2016). *World-Class Warehousing and Material Handling, 2nd Edition*. McGraw Hill Professional. ISBN 0071842837, 9780071842839
131. Frías-Martínez, E.; Williamson, G. y Frías-Martínez, V. (2011) *An Agent-Based Model of Epidemic Spread using Human Mobility and Social Network Information*. Proceedings of the Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT) y 2011 IEEE 3rd International Conference on Social Computing (SocialCom), 8 páginas. Disponible en [fecha de consulta 27.02.2017] <http://www.vanessafriasmartinez.org/uploads/socialcom2011.pdf>
132. Fu, M.M. (2011a). *Port and Economy Relationship Analysis by System Dynamics*. International Conference on Transportation Engineering (ICTE) (pp. 162-167). Chengdu, China: American Society of Civil Engineers. Disponible en [fecha de consulta 27.02.2017] <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41184%28419%2928>
133. Fu, M.M. (2011b). *A Study On Port-Regional Economy System Based On System Dynamics*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=1119360308969767>
134. Fukunari, M. y Malmborg C. J. (2009). *A network queuing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems*. European Journal of Operational Research, vol 193 (1): 152–167. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.049>
135. Galvão Ramos, A.; Oliveira, J.F. y Lopes, M.P. (2014). *A physical packing sequence algorithm for the container loading problem with static mechanical equilibrium conditions*. International Transactions in Operational Research, vol 23 (1-2), pp: 215-238. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/itor.12124/full>
136. Gambardella, L.M.; Bontempi, G.; Taillard, E.; Romanengo, D.; Raso, G. y Piermari P. (1996). *Simulation and forecasting in intermodal container terminal*. Simulation in

-
- Industry, 8th European Simulation Symposium, Genoa, Italy (1996). Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2425555_Simulation_And_Forecasting_In_Intermodal_Container_Terminal
137. Gambardella, L.; Rizzoli, A. y Zaffalon, M. (1998). *Simulation and planning of an intermodal container terminal*. Simulation 71 (2), pp: 107–116. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://people.idsia.ch/~luca/tr-idsia-41-98.pdf>
138. Gao, S. (2012). *Research On The Regional Development Of Dalian Port Based On System Dynamics*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335455484>.
139. Garro, A.; Monaco, M.F.; Russo, W.; Sammarra, M. y Sorrentino, G. (2015). *Agent-based simulation for the evaluation of a new dispatching model for the straddle carrier pooling problem*. Simulation, Vol 91(2); pp: 181-202. Disponible en [fecha de acceso el 24.02.2017] <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0037549714566699>
140. George, J. A. y Robinson, D. F. (1980). *A Heuristic for Packing Boxes into a Container*. Computers and Operations Research, vol 7(3), pp: 147-156. Disponible en [fecha de acceso el 26.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548\(80\)90001-5](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(80)90001-5)
141. Gharehgozli, A.H.; Roy, D. y de Koster, R. (2014). *Sea Container Terminals: New Technologies, OR models, and Emerging Research Areas*. ERIM Report Series Reference No. ERS-2014-009-LIS. 49 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2469175
142. Gharehgozli, A.H.; Roy, D. y de Koster, R. (2016). *Sea Container Terminals: New Technologies, OR models*. Maritime Economics & Logistics, vol 18(2), pp: 103–140. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <https://link.springer.com/article/10.1057/mel.2015.3>
143. Giralt, G.; Chatila, R. y Vaisset, M. (1983). *An integrated navigation and motion control system for autonomous multisensory mobile robots* Robotics Research, pp 191-214 (editores Brady y Paul), Massachusetts Institute of Technology . MIT Press. Cambridge, (Massachusetts, Estados Unidos). Disponible bajo petición en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: 10.1007/978-1-4613-8997-2_31
144. Gosasang, V.; Chandraprakaikul, W. y Kiattisin, S. (2010). *An Application of Neural Networks for Forecasting Container Throughput at Bangkok Port*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol I. London, Reino Unido. ISBN: 978-988-

- 17012-9-9. ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online). Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/45534370_An_Application_of_Neural_Networks_for_Forecasting_Container_Throughput_at_Bangkok_Port
145. Griffin, A. F. y Stanish, C. (2007). *An Agent-Based Model of Prehistoric Settlement Patterns and Political Consolidation in the Lake Titicaca Basin of Peru and Bolivia, Structure and Dynamics*. eJournal of Anthropological and Related Sciences, vol 2(2) – Artículo 2. 47 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 22.03.2017] <http://www.sscnet.ucla.edu/anthro/faculty/stanish/publications/Stanish%202007%20An%20agent-based%20model%20of%20prehistoric%20settlement%20patterns.pdf>
 146. Grosman, P.D.; Jaeger, J.A.G.; Biron, P. M.; Dussault, C. y Ouellet, J.-P (2011). *Trade-off Between Road Avoidance and Attraction by Roadside Salt Pools in Moose: An Agent-Based Model to Assess Measures for Reducing Moose-Vehicle Collisions*. Ecological Modelling vol 222(8), pp:1423-1435. Disponible en [fecha de acceso el 22.03.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.01.022>
 147. Gu, J., Goetschalckx, M. y McGinnis, L. F. (2007). *Research on warehouse operation: A comprehensive review*. European Journal of Operational Research, vol 177 (1): 1–21. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>
 148. Guo, D.; Norrie, D. H. y Fauvel, O.R. (1990). *Object—oriented flexible manufacturing simulation*. Proceedings of the 1990 Summer Computer Simulation Conference (Society for Computer Simulation International, San Diego, Estados Unidos), pp. 225–230.
 149. Guzzi, G.; Santillo, L. y Romano, E. (2013). *A new model to manage vessels flow in a Port Terminal*. Proceedings of the 7th International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling (ASM '13) Recent Advances in Mathematics pp:223-230 (ISBN: 978-1-61804-158-6; ISSN: 2227-4588. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] en <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/CambridgeUSA/MATHECO/MATHECO-34.pdf>.
 150. Haikin, S. (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Pearson Education. 716 Páginas. ISBN-10: 0023527617 / ISBN-13: 978-0023527616.
 151. Hamill, L. y Gilbert, N. (2016). *Agent-Based Modelling in Economics*. John Wiley & Sons: New York. ISBN: 9781118456071. DOI: 10.1002/9781118945520.
 152. Han, L. (2006). *A Study On Port Economic Externality Based On System Dynamics*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335955446>.

-
153. Handini, D.W. y Uchida, M. (2013). *Using System Dynamics to Simulate the Management of Operation and Maintenance of Ship Machinery under a Port Availability Constraint*. International Journal of Supply Chain Management. Vol. 2(4), pp: 76-84. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 27.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/292652234_Using_system_dynamics_to_simulate_the_management_of_operation_and_maintenance_of_ship_machinery_under_a_port_availability_constraint
154. Harder, R. (2017) *OpenTS – Java Tabu Search*. The Computational Infraestructure for Operations Research. COIN – Or Fundation. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <https://www.coin-or.org/Ots/>
155. Hassan, S. A. (1993). *Port activity simulation: An overview*. Simulation Digest (ACM SIGSIM Simulation). Volumen 23 (2): 17-36. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/234806460_Port_activity_simulation_An_overview
156. Hayuth, Y.; Pollatschek, M.A. y Roll, Y. (1994). *Building a port simulator*. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International Volumen 63(3), pp: 179-189. DOI: 10.1177/003754979406300307. Disponible en [fecha de acceso el 20.12.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979406300307>
157. Henesey, L.E. (2002). *Enhancing terminal productivity through Artificial Intelligence: Multi-Agent System Approach*. Proceedings of the 26th Terminal Operators Conference (TOC-Europe 2002), Antwerp (Bélgica). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/267998305_Enhancing_terminal_productivity_through_Artificial_Intelligence_Multi-Agent_System_Approach.
158. Henesey, L. y Törnquist J. (2002). *Enemy at the gates: introduction of multi-agents in a terminal information community*. Proceedings of Ports and Marinas. Rhodos, Greece y publicado posteriormente en Water Studies Series vol 12; pp. 23-32 (2002) Disponible en [fecha de acceso el 17.01.2017] <http://www.bth.se/faculty/lhe/enemy%20at%20the%20gates/HeneseyTornquist.pdf>.
159. Henesey, L.E.; Wernstedt, F. y Davidsson, P. (2002). *A Market Based Approach to Container Port Terminal Management*. Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence, Workshop (ECAI 2002) - Agent Technologies in Logistics, Lyon (Francia). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016]

https://www.researchgate.net/publication/2538809_A_Market-Based_Approach_to_Container_Port_Terminal_Management

160. Henesey, L. E. (2003). *More than just Piers: a multi-agent system in defining organization in a seaport terminal management system*. Proceedings of the 47th Annual Conference of the International Society for the Systems Sciences (ISSS) (Special Integration Group on Systems Applications to Business and Industry), Creta (Grecia). ISBN 0-974073504. (9 páginas). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/ISSS-2003/Final%20for%20ISSS-%202003.pdf>
161. Henesey, L. E., Notteboom, T., y Davidsson, P. (2003a). *Agent-based simulation of stakeholders relations: An approach to sustainable port and terminal management*. Proceedings of the International Association of Maritime Economists Annual Conference, Busan (Corea del Sur). 17 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/244452451_Agent-based_simulation_of_stakeholders_relations_An_approach_to_sustainable_port_terminal_management
162. Henesey, L. E.; Wernstedt, F. y Davidsson, P. (2003b). *Market Driven Control in Container Terminal Management*. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '03), Hamburgo (Alemania), pp: 377-386. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2832158_Market-Driven_Control_in_Container_Terminal_Management
163. Henesey, L. E., Davidsson, P., and Persson, J.A. (2004). *Using Simulation in Berth Planning at a Container Terminal*. Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT'04), Siguënza (España) (9 -12 Mayo 2004), pp: 61-72. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/30499320_Using_Simulation_in_Evaluating_Berth_Allocation_at_a_Container_Terminal
164. Henesey, L. E. (2004a). *Enhancing Container Terminal Performance: A Multi Agent Systems Approach*. Department of Systems and Software Engineering. School of Engineering Blekinge Institute of Technology (Karlskrona, Suecia). Karlshamn, Sweden. Licentiate Series No 2004:06. 121 Páginas. ISSN 1650-2140 / ISBN 91-7295-040-4. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Lic.pdf>
165. Henesey, L. E. (2004b). *A Multi Agent Based Simulator for Managing a Container Terminal*. 2nd European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2004), 16 – 17 de

-
- diciembre de 2004, Barcelona (España). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/228772835_A_Multi_Agent_Based_Simulator_for_Managing_a_Container_Terminal
166. Henesey, L. E. (2006a). *A Simulation Model for Analysing Terminal Management Operations*. Proceeding of the 4th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '05), Hamburgo, Alemania. (8-11 Mayo 2006) Páginas 100-113. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Compit05/COMPIT2005%20Final.pdf>
167. Henesey, L.E. (2006b). *Multi-Agent Systems for Container Terminal Management*. Department of Systems and Software Engineering School of Engineering. Blekinge Institute of Technology (Sweden) Blekinge Institute of Technology Doctoral Dissertation Series (ISBN 978-91-7295-099-3). 295 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/phd.pdf>.
168. Henesey, L. E. y Persson, J.A. (2006). *Application of Transaction Costs In Analyzing Transport Corridors Using Multi-Agent-Based Simulation*. Promet Traffic & Transportation: Scientific Journal on Traffic and Transportation Research. Vol 18(2), pp: 59-65. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/666/520
169. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006a). *Agent Based Simulation Architecture for Evaluating Operational Policies in Transshipping Containers*. 4th German Conference on Multiagent System Technologies (MATES 2006). Lecture Notes in Computer Science - LNAI Vol. 4196, pp: 73-85, Editado por K. Fischer y I. Timm (Eds), Springer-Verlag, Berlin y Heidelberg, Alemania. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/225651016_Agent_Based_Simulation_Architecture_for_Evaluating_Operational_Policies_in_Transshipping_Containers
170. Henesey, L. E.; Aslam, K. y Khurum, M. (2006b). *Task Coordination of Automated Guided Vehicles in a Container Terminal*. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '06), Oud Poelgeest, Leiden (Holanda), pp: 54-64. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Compit06/COMPIT2006-Henesey%20final.pdf>
171. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006c). *Simulation of Operational Policies for Transshipment in a Container Terminal*. Proceedings of the 10th World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Multiconference on Circuits, Systems,

- Communications, and Computers, 13-15 Julio 2006, Atenas (Grecia), pp: 1289-1294. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/262278067_Simulation_of_operational_policies_for_transshipment_in_a_container_terminal
172. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006d). *Evaluating Container Terminal Transshipment Operational Policies: An Agent-Based Simulation Approach*. Journal WSEAS Transactions on Computers Volumen 5(9), pp: 2090-2098. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/242072279_Evaluating_Container_Terminal_Transshipment_Operational_Policies_An_Agent-Based_Simulation_Approach
 173. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2007). *Comparison and evaluation of two automated guided vehicle systems in the transshipment of containers at a container terminal*. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, Leiden (Holanda), pp: 54-64. Publicado en Proceedings of the MODSIM World Conference 2007, Virginia Beach, Virginia (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/271504686_Comparison_and_Evaluation_of_Two_Automated_Guided_Vehicle_Systems_in_the_Transshipment_of_Containers_at_a_Container_Terminal
 174. Henesey, L.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2008). *Evaluation of Automated Guided Vehicle Systems for Container Terminals Using Multi Agent Based Simulation*. Proceedings of the 9th International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, pp: 85-96 (celebrado junto con AAMAS'08), 12-18 de Mayo de 2008, Estoril (Portugal). Disponible en [fecha de acceso el 23.03.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-01991-3_7
 175. Henesey, L., Davidsson, P. y Persson, J.A. (2009a). *Evaluation of automated guided vehicle systems for container terminals using multi agent based simulation*. Multi-Agent-Based Simulation IX: International Workshop, vol. 2569, pp.85–96, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/30498925_Evaluation_of_Automated_Guided_Vehicle_Systems_for_Container_Terminals_Using_Multi_Agent_Based_Simulation
 176. Henesey, L., Davidsson, P. y Persson, J.A. (2009b). *Agent based simulation architecture for evaluating operational policies in transshipping containers*. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 18(2), pp.220–238. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1499102.1499106>

-
177. Heppenstall, A.J.; Crooks, A.T.; See, L.M. y Batty, M. (eds). *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Springer: Dordrecht. ISBN: 978-90-481-8926-7 (A.J. Heppenstall, A.T. Crooks, L.M. See y M. Batty (eds)). Springer: New York, pp: 85–108. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://www.springer.com/us/book/9789048189267>
178. Ho, K. H.; M.W. Hoy C.M. Hui (2008). *Structural Dynamics in the Policy Planning of Large Infrastructure Investment under the Competitive Environment: Context of Port Throughput and Capacity*. American Society of Civil Engineers (ASCE) - Journal of Urban Planning and Development. vol 134(1), pp.9–20.. Disponible en [fecha de acceso el 20.02.2017] [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2008\)134%3A1\(9\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9488(2008)134%3A1(9))
179. Hsieh, S. y Tsai, K.C. (2001). *A BOM oriented class-based storage assignment in an automated storage/retrieval system*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 17 (1): 683-691. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] DOI: [10.1007/s001700170134](https://doi.org/10.1007/s001700170134)
180. Hsieh, S., Hwang J.S. y Chou, H.C. (1998). *A Petri-net-based structure for AS/RS operation modelling*. International Journal of Production Research, vol. 36(12): 3323-3346. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/002075498192085>
181. Huang, W. y He, K. (2009). *A new heuristic algorithm for cuboids packing with no orientation constraints*. Computer & Operations Research 36 (2009), pp: 425-432. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/a-new-heuristic-algorithm-for-cuboids-packing-with-no-orientation-NCX23FTOEW>
182. Hunt, C.A.; Kennedy, R.C.; Kim, S.H.J. y Ropella, G.E.P. (2013). *Agent-based modeling: A systematic assessment of use cases and requirements for enhancing pharmaceutical research and development productivity*. Systems Biology and Medicine vol. 5(4), pp: 461–480. Disponible en [fecha de acceso el 24-01-2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wsbm.1222/full>
183. Hur, S. y Nam, J. (2006). *Performance analysis of automatic storage/retrieval systems by stochastic modelling*. International Journal of Production Research, vol. 44 (8): 1613–1626. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540500410176>
184. Huynh, N. y Vidal, J.M. (2010). *An Agent-Based Approach to Modeling Yard Cranes at Seaport Container Terminals*. Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling

- and Simulation, 2010., pp: 1-8. Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] <http://jmvidal.cse.sc.edu/papers/huynh10a.pdf>
185. Huynh, N. y Vidal, J.M. (2012). *A novel methodology for modelling yard cranes at seaport to support planning and realtime decision making*. Six Sigma Coma. Ad , vol 7(1), pp: 62-91. Disponible en [fecha de acceso el 27.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1504/IJSSCA.2012.045265>
 186. Hwang Y.K. y Ahuja N. (1992). *A potential field approach to path planning*. Transaction on Robotics and Automation, vol. 8(1); 23-32. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] http://vision.ai.illinois.edu/publications/potential_field_TRA_1992.pdf
 187. Ioannou, P.A.; Jula, H. y Dougherty, E. (2001). *Advanced Material Handling: Automated Guided Vehicles in Agile Ports*. FINAL REPORT - Task 1.2.6.1 preparado para el Center for Commercial Deployment of Transportation Technologies (California State University at Long Beach, California, Estados Unidos) por el Center for Advanced Transportation Technologies (University of Southern California, California, Estados Unidos). 135 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 10.05.2017] <http://catt.usc.edu/assets/001/68519.pdf>
 188. ISL - SCUSY (2009). *Simulation of container unit handling system*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] Disponible en http://www.isl.org/products_services/scusy/index.php
 189. ISL – VITO (2010). *VITO – virtual terminal optimisation*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] Disponible en <https://www.isl.org/en/projects/vito>
 190. Jackson, J. (2010). *Improving energy efficiency and smart grid program analysis with agent-based end-use forecasting models*. Energy Policy, vol 38(2010), pp: 3771–3780, Disponible en [fecha de acceso el 25.03.2017] <http://www.maisy.com/agentbm.pdf>
 191. JADE (2009) (noticia publicada el 16 de junio de 2009). *Port Nelson Extends Jade Master Terminal To Manage Break Bulk Cargo*. JADE Logistics. Christchurch (Nueva Zelanda). Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] https://secure.jadeworld.com/downloads/news/pr_PtNelsonWarehousing.pdf
 192. JADE (2015). *World Cargo News talk to Jade's Kaustubh Dalvi about the recent installation of Master Terminal at Abu Dhabi Ports*. JADE Logistics. Christchurch (Nueva Zelanda). Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017]

-
- <https://www.jadeworld.com/media-center/world-cargo-talk-jades-kaustubh-dalvi-about-recent-installation-master-terminal-at-abu-dhabi-ports/>
193. JADE (2017a). *Jade. Master Terminal TOS*. © Jade Software Corporation. Christchurch, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <https://www.jadeworld.com/solutions-for/logistics/master-terminal-tos/>
194. JADE (2017b). *Jade. Master Technical Overview*. © Jade Software Corporation. Christchurch, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <https://www.jadeworld.com/pdf/jml/jade-logistics-master-terminal-tos-product-overview.pdf>
195. JADE (2017c). *Jade: Our customers, satisfied logistics clients around the world*. © Jade Software Corporation. Christchurch, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <https://www.jadeworld.com/solutions-for/logistics/our-customers/>
196. Jerry, K.; Yujun, K.; Kwasi, O.; Enzhan, Z. y Parfait, T. (2015). *NetLogo implementation of an ant colony optimisation solution to the traffic problem*. Intelligent Transport Systems, IET, vol 9(9), pp: 862-869. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/280558637_NetLogo_implementation_of_an_ant_colony_optimisation_solution_to_the_traffic_problem
197. Johansson, S.J.; Davidsson, P. y Carlsson, B. (2000). *Coordination models for dynamic resource allocation*. Proceedings of the 4th International Conference on Coordination Languages and Models (Editado por A. Porto y G.-C. Roman), volumen 1906 (Lecture notes in computer science), pp: 182–197. Springer Verlag, 2000. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-45263-X_12
198. Johansson, S.J.; Davidsson, P. y Kristell, M. (2002). *Four architectures for dynamic resource allocation*. Proceedings of 4th International Workshop on Mobile Agents for Telecommunication Applications, 2002. Springer Verlag, LNCS
199. Kalyanaraman, P. y Keerthika, C. (2016). *A Review on Automated Storage/ Retrieval Systems and Shuttle Based Storage/Retrieval Systems*. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol 4(11): 167-171. ISSN: 2321-8169 Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] http://www.ijritcc.org/download/browse/Volume_4_Issues/November_16_Volume_4_Issue_11/1480410197_29-11-2016.pdf
200. Karcianas, N. y Hessami, A. (2010a). *Complexity and the notion of System of Systems: Part (I): general systems and complexity*. Proceedings of the World Automation

- Congress, WAC-2010 (19-23 de Septiembre de 2010, Kobe, Japón), vol 1, pp.912-918. ISBN 978-1-4244-9673-0. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://ieeexplore.ieee.org/document/5665613/>
201. Karcianas, N. y Hessami, A. (2010b). *Complexity and the notion of System of Systems: Part (II): defining the notion of System of Systems*. Proceedings of the World Automation Congress, WAC-2010, (19-23 de Septiembre de 2010, Kobe, Japón), vol 1, pp: 919-925. ISBN 978-1-4244-9673-0. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://ieeexplore.ieee.org/document/5665614/>
 202. Ke, L.; S. Cheng y Y. Jiangnan (2009). *The Combination Forecasting of Nanchang Port's Cargo Throughput*. International Conference on Management and Service Science, 2009. MASS '09. pp. 1–4. ISBN:978-1-4244-4638-4. DOI: 10.1109/ICMSS.2009.5302371. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.ieee-art-000005302371>
 203. Kefi, M.; Ghedira, K.; Korbaa, O. y Yim, P. (2007). *Container Handling Using Multi-Agent Architecture*. Proceedings of the Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, First KES International Symposium, KES-AMSTA 2007, Wroclaw (Polonia), 31 Mayo - 1 Junio de 2007, pp: 685-693. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/221254885_Container_Handling_Using_Multi-agent_Architecture
 204. Keserla, A. (1994). *Analysis of dual-shuttle automated storage/retrieval systems*. Journal of Manufacturing Systems, vol.13(6): 424-434. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(95\)90066-T](https://doi.org/10.1016/0278-6125(95)90066-T)
 205. Khatib, O. y Le Maitre, J.F. (1978). *Dynamic control of manipulators operating in a complex environment*. Proceedings of the 3rd CISM-IFTToMM - Symposium Theory Practice Robots Manipulators, pp: 267-282. 12-15 de Septiembre de 1978. Udine (Italia). © Elsevier 1979. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] ai.stanford.edu/manips/publications/pdfs/Khatib_1978.pdf
 206. Khatib, O. (1980). *Commande dynamique dans l'espace opérationnel des robots manipulateurs en présence d'obstacles*. Tesis Doctoral . École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (ENSAE). Toulouse (Francia). Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] https://cs.stanford.edu/group/manips/publications/pdfs/Khatib_1980_thesis.pdf

-
207. Khatib, O. (1983) *Dynamic control of manipulators in operational space*. Proceedings of the 6th CISM-IFTOMM - Congress Theory Machines Mechanisms, pp: 1128-1131. 15-20 de Diciembre de 1983, Nueva Delhi (India). Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] https://cs.stanford.edu/group/manips/publications/pdfs/Khatib_1983.pdf
208. Khatib, O. (1985). *The operational space formulation in robot manipulators control*. Proceedings of the 15th International Symposium on Industrial Robots (Editado por Japan Industrial Robot Association), 11-13 de Septiembre de 1985, Tokyo (Japón).
209. Khatib, O. (1986). *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*. International Journal of Robotics Research, vol 5(1): 90 – 98. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498600500106>
210. Khatib, O. y Burdick, J. (1987). *Dynamic optimization in manipulator design: the operational space formulation*. The International Journal of Robotics and Automatation, vol 1, pp: 510-518.
211. Khatib, O. (1987). *A unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation*. Journal of Robotics and Automation, vol RA-3(1): 43-53. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] https://cs.stanford.edu/group/manips/publications/pdfs/Khatib_1987_RA.pdf
212. Khoshnevis, B. y Rogers, R. (1983). *An Automated Warehouse Simulator System*. Proceedings of the 5th International Conference on Automation in Warehousing, Atlanta, Georgia (Estados Unidos).
213. Khoshnevis, B. y Kiran, A. (1986). *A FMS MANufacturing Systems*. Journal of Manufacturing Systems, vol 5 (1): 65-68. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(86\)90068-3](https://doi.org/10.1016/0278-6125(86)90068-3)
214. Khoshnevis, B. y Asef-vaziri, A. (2000). *3d virtual and physical simulation of automated container terminal and analysis of impact on in land transportation*. Metrans transportation Center - Universidad Southern California. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] https://www.metrans.org/sites/default/files/research-project/99-14_Final_0_0.pdf
215. Kia, M.; Shayan, E. y Ghotb, F. (2002). *Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation*. Computer and Industrial Engineering, vol 42(2-4), pp: 533–540. Disponible en [fecha de último acceso el 24.10.2016] [https://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00051-7](https://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00051-7)

216. Kim, J. y Seidmann A. (1990). *A framework for the exact evaluation of expected cycle times in automated storage systems with full-turnover item allocation and random service requests*. Computers & Industrial Engineering, vol.18(4): 601-612. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] [doi>10.1016/0360-8352\(90\)90018-H](https://doi.org/10.1016/0360-8352(90)90018-H)
217. Knapp, G.M. y Wang, H.P: (1992). *Modeling of automated storage/retrieval systems using Petri nets*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 11(1): 20-29. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(92\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0278-6125(92)90014-7)
218. Ko, J.-M. (1996). *The path planning and prototype design of an AGV*. Master Thesis, National Cheng University (Taiwan).
219. Koh, P.-H.; Goh, J. L.-K.; Ng , H.-S. y Ng, H.C. (1994a). *Using simulation to preview plans of a container port operations*. Proceeding of the 26th Winter Simulation Center (1994). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A: Sadowski y A.F. Seila, pp: 1109-1115. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0162.pdf
220. Koh, H.; Tan, S.L.; Goh, L.K y Ng, K.L. (1994b). *A decision support system for container port operations*. New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications (1994), pp: 451–457
221. Kondratowicz, L. J. (1990). *Simulation methodology for intermodal freight transportation terminals*. Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International Volumen 51 (1); pp: 49-59. (1990). DOI: 10.1177/003754979005500110. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/238834970_Simulation_methodology_for_intermodal_freight_transportation_terminals
222. Kondratowicz, L. J. (1992). *Methodological solutions for increased efficiency of modelling and simulation of seaports and inland freight terminals*. Maritime Policy Management 19 (2), pp: 157-64. 1992. DOI: 10.1080/03088839200000022. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/232864218_Methodological_solutions_for_increased_efficiency_of_modelling_and_simulation_of_seaports_and_inland_freight_terminals
223. Koren, Y. y Borenstein (1991). *Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp: 1398-1404. 9-11 de abril de 1991. Sacramento (California,

-
- Estados Unidos). Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/738a/a7b9fda536e7d603e9d84725f38f96b50150.pdf>
224. Konings, R. (2007). *Opportunities to improve container barge handling in the port of rotterdam from a transport network perspective*. Journal of Transport Geography, vol 15(5): 443–454. Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] https://www.researchgate.net/publication/222632948_Opportunities_to_improve_container_barge_handling_in_the_port_of_Rotterdam_from_a_transport_network_perspective
225. Koseler, S. (2008). *Intermodal Logistics System Simulation Model & the Empty Container Flows*. Tesis Doctoral. Universidad de Bergen. (Director de Tesis: Prof. Paal Davidsen - System Dynamics Group – Departamento de Geografía) 169 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] <http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/3311/50101879.pdf?sequence=1>
226. Krogh, B.H. y Thorpe, C.E. (1986). *Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicles*. Proceedings of 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '86), April 1986, vol 3: 1664 – 1669. Disponible bajo petición en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: 10.1109/ROBOT.1986.1087444
227. Kuhn Jr., J. R.; Courtney, J. F.; Morris, B. y Tatara, E.R. (2010). *Agent-Based Analysis and Simulation of the Consumer Airline Market Share for Frontier Airlines*. Knowledge-Based Systems vol 23(8), pp: 875-882. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/223397698_Agent-based_analysis_and_simulation_of_the_consumer_airline_market_share_for_Frontier_Airlines
228. Kuo, P. -H., Krishnamurthy, A. y Malmborg, C. J. (2007). *Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies*. Applied Mathematical Modelling, vol 31(10): 2332–2346. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/222789540_Design_models_for_unit_load_storage_and_retrieval_systems_using_autonomous_vehicle_technology_and_resource_conserving_storage_and_dwell_point_policies
229. Kuo, P.H., Krishnamurthy, A. y Malmborg, C.J. (2008). *Performance modelling of autonomous vehicle storage and retrieval systems using class-based storage policies*. International Journal of Computer Applications in Technology, vol. 31(3-4): 238-248. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] doi>10.1504/IJCAT.2008.018160

230. Kwok, A. y Norrie, D. (1993). *Intelligent agent systems for manufacturing applications*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol 4(4), pp: 285-293. Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00124141>
231. INPLAN (2017). *INPLAN Terminal Operating Solution (TOS)*. INPLAN GmbH Software for Logistics. Mülheim, Essen (Alemania). Disponible en [fecha de acceso el 21.02.2017] <http://www.inplan.de/software.php?category=5>
232. Lai, K. K. y Lam, K., (1994). *A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong*. International Journal of Modeling & Simulation. Vol 14(3), pp: 134-138. Disponible en [fecha de acceso el 26.01.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02286203.1994.11760228>
233. Lake, M.W. (2014). *Trends in archaeological simulation*. Journal of Archaeological Method and Theory, vol 21(2), pp: 258–287. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10816-013-9188-1>
234. Lam, J.S.L. y Yap, W.Y. (2011). *Dynamics of liner shipping network and port connectivity in supply chain systems: analysis on East Asia*. Journal of Transport Geography – vol 19(6), pp: 1272–1281. (DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.06.007). Disponible en [fecha de acceso el 10.12.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692311001013>
235. Lattila, O.L. y Saranen, J. (2011). *Multimodal transportation risk in Gulf of Finland Region*. World Review of Intermodal Transportation Research, volume 3(4), pp: 376-394. Disponible en [fecha de acceso el 12.12.2016] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/WRITR.2011.041719>
236. Lawrence, P. (1973). *A computer simulation model for port planning*. International Journal of Physical Distribution, vol 4(1), pp: 26–39.
237. LBR Staff Writer (2010) (noticia en línea publicada el 2 de febrero de 2010). *Jade To Deploy JMT In New GulfTainer Terminal*. LBR Transport Infraestructure. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] http://transportinfrastructure.logistics-business-review.com/news/jade_to_deploy_jmt_in_new_gulftainer_terminal_100203
238. LeBaron, B. (2005). *Agent-based computational finance*. International Business School, Brandeis University; Waltham, Massachusetts (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 18.10.2016] <http://people.brandeis.edu/~blebaron/wps/hbook.pdf>
239. Lee, P.-S. y Wang, L.-L. (1994). *Collision avoidance by fuzzy logic control for automated guided vehicle navigation*. Journal of Robotic Systems, vol. 11(8): 743-760. Disponible

-
- en [fecha de consulta 04.05.2017]
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.4620110807/abstract>
240. Lee, S.-Y. y Cho, G.S. (2007). *A Simulation Study for the Operations Analysis of Dynamic Planning in Container Terminals Considering RTLS*. Proceedings of the Innovative Computing, Information and Control, International 2007 (ICICIC'2007) (5-7 Septiembre 2007), pp. 116, ISBN: 0-7695-2882-1. doi:10.1109/ICICIC.2007.89. Disponible en [fecha de acceso el 14.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/4310238_A_Simulation_Study_for_the_Operations_Analysis_of_Dynamic_Planning_in_Container_Terminals_Considering_RTLS
241. Legato P. y Mazza, R. (2001). *Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation*. European Journal Operational Research 133 (3), pp: 537–547. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]
[http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00200-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00200-9)
242. Leitão, P. (2009). *Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol 22(7), pp: 979–991. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2008.09.005>
243. Lerher, T. (2013). *Modern automation in warehousing by using the shuttle-based technology*. Incluido en Arent, D., Freebush, M. (eds.), Automation Systems of the 21st Century: New Technologies, Applications and Impacts on the Environment & Industrial Processes, Nova Science Publishers, New York, 2013, pp. 51-86.
244. Lerher, T., Edl, M. y B. Rosi, B. (2014). *Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 70(1-4), 2014, pp. 97-115 Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] doi:10.1007/s00170-013-5253-x
245. Lerher, T., Ekren, Y.B., Sari, Z. y Rosi, B. (2015). *Simulation analysis of shuttle based Storage and retrieval systems*. International Journal of Simulation Modelling, vol. 14(1): 48-59. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017]
http://www.ijsimm.com/Full_Papers/Fulltext2015/text14-1_48-59.pdf
246. Lerher, T., Šraml, M., Borovinšek, M. y Potrč, I. (2012). *Multi-objective optimization of automated storage and retrieval systems*. Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Logistics, ICIL 2012, Zadar, Croatia. . Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2013/ANNALS-2013-1-26.pdf>

247. Leyk, S.; Binder, C. R. y Nuckols, J. R. (2009). Spatial Modeling of Personalized Exposure Dynamics: The Case of Pesticide Use in Small-Scale Agricultural Production Landscapes of the Developing World. *International Journal of Health Geographics*, vol 8(17), pp: 1-16. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] link.springer.com/content/pdf/10.1186/1476-072x-8-17.pdf
248. Li, W.F., Li, B., y Zhang, Y. (2008). *Container terminal scheduling and decision-making using simulation based optimization and business intelligence*. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008. (ICMA 2008). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/224393571_Container_terminal_scheduling_and_decision-making_using_simulation_based_optimization_and_business_intelligence
249. Li, B., Li, W.F. y Voss, S. (2009). *Modeling container terminal scheduling systems as hybrid flow shops with blocking based on attributes*. In *Logistik Management*, 413-434. Berlin: Springer-Verlag. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-7908-2362-2_21
250. Li, B. y Li, W.F. (2010). *Modelling and Simulation of Container Terminal Logistics systems using Harvard Architecture and Agent-Based Computing*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Huan, and E. Yücesan, eds, pp: 3396-3410 (2010). Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/314.pdf>
251. Li, G. (2010). *Agent-Based Container Terminal Optimisation*. Thesis para la obtención del grado de *Master of Applied Science* en la Universidad de Otago (Dunedin , Nueva Zelanda) (dirigido por Pr. Michael Winikoff). Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <https://ourarchive.otago.ac.nz/bitstream/handle/10523/1773/Guannan%20LiMasterthesis.pdf;sequence=1>
252. Li, J.; Chen, Y.; Liu, S. y Sun, G. (2010a). *Port supply chain simulation based on system dynamics method*. Proceedings of the 2nd Conference on Computer and Automation Engineering Conference (ICCAE'10), vol 4, pp: 428-432. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/251923481_Port_supply_chain_simulation_based_on_system_dynamics_method
253. Li, D. y Wang, X. (2012). *System Dynamics Simulation Model for Port Economy Analysis*. Proceedings of the 6th International Conference on Management Science and Engineering Management. Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 185, 2013,

-
- pp 475-482. Springer London. Disponible en [fecha de acceso el 19.02.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4471-4600-1_41
254. Li, L.; Negenborn, R.R. y Schutter, B.D. (2014). *Multi-agent cooperative transport planning of intermodal freight transport*. Proceedings of the 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2014), pp. 2465–2471.
255. Li, L.; Negenborn, R.R. y Schutter, B.D. (2016). *Distributed model predictive control for cooperative synchromodal freight transport*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (en impresión). Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] <http://doi.org/10.1016/j.tre.2016.08.006>
256. Liu, X.; B. Zhao; B. Li y N. Wang (2010). *A System Dynamics Model of the Interaction between Port and City Based on the Green Concept*. Proceedings of the CLEM 2010: Logistics For Sustained Economic Development: Infrastructure, Information, Integration y Volume I - Logistics Policy and Strategy, pp. 681-688. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41139%28387%2995>
257. Long S.; H. Nachtmann,; F. Oztanriseven y L. Pérez-Lespier (2014). *Feasibility Analysis of System Dynamics for Inland Maritime Logistic*. Center for Transportation Infrastructure and Safety. National University Transportation Center at Missouri University of Science and Technology. Internal Report NUTC R356. (febrero 2014). Disponible en [fecha de acceso el 29/11/216] http://ntl.bts.gov/lib/52000/52700/52726/R356_Final_Report.pdf
258. Lozano-Pérez, T. y Wesley, M.A. (1979). *An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles*. Communications of the Association for Computing Machinery (ACM), vol. 22(10): 560-570. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] [doi>10.1145/359156.359164](http://doi.org/10.1145/359156.359164)
259. Lua (2017). *Lua programming lenguaje*. LabLua. Departamento de Informática, PUC-Rio de Janeiro (Brasil). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.lua.org>
260. Luan, W.; Chen, H. y Wang, Y. (2010). *Simulating Mechanism of Interaction Between Ports and Cities Based on System Dynamics: A Case of Dalian, China*. Chinese Geography Society 2010, vol 20(5), pp: 398-405 (DOI: 10.1007/s11769-010-0413-5. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://egeoscienc.neigae.ac.cn/fileup/PDF/20100915.pdf>
261. Luca, S.; Cantarella, G.E. y Carteni, A. (2009). *A macroscopic model of a container terminal based on diachronic networks*. En N.H.M. Wilson y A. Nuzzolo (Eds.),

Schedule-Based Dynamic Transit Modeling: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, 2009, pp. 285–310.

262. Luke, S.; Balan, G.; Panait, L.; Cioffi-Revilla, C.; Paus, S. y. (2003). *MASON: A Java Multi-Agent Simulation Library*. Proceedings of the Agent 2003 Conference. 15 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/publications/Agent2003.pdf>
263. Luke, S.; Cioffi-Revilla, C.; Panait, L. y Sullivan, K. (2004). *MASON: A New Multi-Agent Simulation Toolkit*. Proceedings of the 2004 SwarmFest Workshop. 8 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/publications/SwarmFest04.pdf>
264. Luke, S.; Cioffi-Revilla, C.; Panait, L.; Sullivan, K. y Balan, G. (2005). *MASON: A multiagent simulation environment*. Simulation vol 81(7), pp: 517–527. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <https://cs.gmu.edu/~sean/papers/simulation.pdf>
265. Luke, D.A. y Stamatakis, K.A. (2012). *Systems science methods in public health: Dynamics, networks, and agents*. Annual Review of Public Health vol 33(abril 2012), pp: 357–376. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-publhealth-031210-101222?journalCode=publhealth>
266. Macal, C.M. y North M.J: (2013). *Introductory tutorial: Agent-Based Modeling and Simulation*. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (Editado por R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, y M. E. Kuhl), pp: 362-376. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 22.03.2017] <http://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/031.pdf>
267. Macal, C.M. (2016). *Everything you need to know about agent-based modelling and simulation*. Journal of Simulation 10; pp: 144- 156. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/302923196_Everything_you_need_to_know_about_agent-based_modelling_and_simulation
268. Mack, D.; A. Bortfeldt y H. Gehring. (2004). *A Parallel Hybrid Local Search Algorithm for the Container Loading Problem*. International Transactions in Operational Research. Vol 11(5), pp: 511–533. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-3995.2004.00474.x/abstract>
269. Madachy, R.; Haas, B.; Bradbury, H.; Newell, J.; Rahimi, M.; Vos, R. y Wolch, J. (2008). *Achieving sustainable development in southern California: Collaborative Learning through*

-
- System Dynamics Modelling*. 18th Annual Symposium of International Council of Systems Engineering. Holanda (June 18). Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] http://urbansustainability.snre.umich.edu/wp-content/uploads/2014/08/2008_Madachy-et-al_Achieving-sustainable-development-in-southern-California.pdf.
270. Maddala, G.S. y Lahiri. K. (1992). *Introduction to econometrics*. Revista de Economía Aplicada, vol 3(1), pp: 223-226. Editado por Macmillan (New York). Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://www.revecap.com/revista/numeros/03/pdf/raymond.pdf>
271. Maglio, P.P.; Sepulveda, M.-J. y Mabry, P.L. (2014). *Mainstreaming modeling and simulation to accelerate public health innovation*. American Journal of Public Health. Vol. 104(7), pp: 1181–1186. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://ajph.aphapublications.org/doi/10.2105/AJPH.2014.301873>
272. Makita, Y.; Hagiwara, M. y Nakagawa, M. (1994). *A simple path planning system using fuzzy rules and a potential field*. Proceedings of the 3rd IEEE Conference n Fuzzy Systems & IEEE World Congress on Computational Intelligence, Orlando (Florida, Estados Unidos), 26-29 de Junio de 1994. Volumen 2, pp. 994-999. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] <http://10.0.4.85/FUZZY.1994.343871>
273. Malleson, N. (2007). *Human Behaviour in an Agent-Based Model of Burglary*. Paper presentado en GeoComputation 2007, 3-5 Septiembre de 2007, NUI Maynooth (Irlanda) Disponible en [fecha de acceso el 20.03.2017]
274. Malleson, N. (2008). *Improving Burglary-Reduction Initiatives Through A Realistic Agent-Based simulation*. Presentación en British Society of Criminology Conference, 9-11 de JUnio de 2008. Universidad de Huddersfield (Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso el 20.03.2017] http://www.geog.leeds.ac.uk/fileadmin/documents/peoplepages/n.malleson/bsc_talk08.pdf
275. Malleson, N. (2009). *Using Simulation to Predict Prospective Burglary Rates in Leeds and Vancouver*. Paper presentado en 7th National Crime Mapping Conference, Manchester (Reino Unido), 7-8 de Mayo de 2009. Manchester (Reino Unido).
276. Malleson, N. (2010). *Agent-Based Modelling of Burglary*. PhD Thesis, School of Geography, University of Leeds (Reino Unido). 92 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 20.03.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.99.8246&rep=rep1&type=pdf>

277. Malleson, N.; Heppenstall, A. y See, L. (2010). *Crime reduction through simulation: An agent-based model of burglary*. Computers, Environment and Urban Systems, volumen 34(3), pp: 236–250. Disponible en [fecha de acceso el 20.03.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971509000787>
278. Malmborg, C.J. (2003). *Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol. 41(5): 1057-1069. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/0020754021000033887>
279. Malmborg, C.J. (2000). *Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol. 38(18), 2000, pp.4599-4610. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540050205532>
280. Malmborg, C.J. (2001a). *Rule of thumb heuristics for configuring storage racks in automated storage and retrieval systems design*. International Journal of Production Research, vol. 39(3): 511-527. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/0020754001004368>
281. Malmborg, C.J. (2001b). *Estimating cycle type distributions in multi-shuttle automated storage and retrieval systems*. International Journal of Industrial Engineering, vol. 8(2): 150-158. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/286049716_Estimating_cycle_type_distributions_in_multi-shuttle_automated_storage_and_retrieval_systems
282. Malmborg, C.J. (2002). *Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol. 40(8): 1807-1822. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540110118668>
283. Manzini, R. (2012). *Warehousing in the Global Supply Chain, chapter 8: Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies*. Springer-Verlag, London, 2012. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://www.springer.com/us/book/9781447122739>
284. Manzini, R., Gamberi, M. y Regattieri, A. (2006). *Design and control of an AS/RS*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 28(7-8): 766–774. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/225862856_Design_and_control_of_an_ASRS

-
285. Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S. y Tappia, E: (2011). *Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes*. International Journal of Production Research, vol. 50(24): 7134-7148. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.639815>
286. Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S. y Tappia, E: (2013). *Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol.51(14): 4365-4387. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.778430>
287. MASON (2016). *MASON*. Department of Computer Science. George Mason University. Fairfax, Virginia (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 15.02.2017] <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>
288. Mastrolilli, M.; Fornara, N.; Gambardella, L. M; Rizzoli, A. E. y Zaffalon, M, (1998). *Simulation for policy evaluation, planning and decision support in an intermodal container terminal*. Proceedings of the International Workshop 'Modeling and Simulation within a Maritime Environment', Editado por Y. Merkuryev, A. Bruzzone y L. Novitsky Society for Computer Simulation International, Riga, Latvia, (1998). Sep 6-8, pp: 33-38. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2608020_Simulation_For_Policy_Evaluation_Planning_And_Decision_Support_In_An_Intermodal_Container_Terminal.
289. Meadows, D.H.; Meadows, G.; Randers, J. y Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth*. New York Universe Books. 207 páginas. ISBN-10: 0451057678. ISBN-13: 978-0451057679
290. Menges, F., Mishra, B. y Narzisi, G. (2008). *Modeling and Simulation of E-Mail Social Networks: A New Stochastic Agent-Based Approach*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, editado por S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, y J. W. Fowler, pp: 2792-2800. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <https://cs.nyu.edu/mishra/PUBLICATIONS/08.wsc08Expert.pdfand-simulation-of-email-social-networks.pdf>
291. Merkuryev, Y.; Tolujew, J.; Blümel, E.; Novitsky, L.; Ginters, E.; Viktorova, E.; Merkuryeva, G. y Pronins, J. (1998). *A modelling and simulation methodology for managing the Riga harbor container terminal* Simulation: : Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, Vol. 71, No. 2, pp: 84-95, 1998. DOI: 10.1177/003754979807100203. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016]

https://www.researchgate.net/publication/220165111_A_Modelling_and_Simulation_Methodology_for_Managing_the_Riga_Harbour_Container_Terminal

292. Mes, M.; Iacob, M.-E. y van Hilleghersberg, J. (2014). *A distributed barge planning game*. En: Meijer, S.A., Smeds, R. (eds.). Proceedings of the International Simulations and Gaming Association (ISAGA 2013), Estocolmo (Suecia), 24-28 de Junio de 2013, y recogido en Frontiers in Gaming Simulation, vol. 8264, pp. 214-221. Springer, Heidelberg. Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-04954-0_25?no-access=true
293. Mes, M. y Douma A. (2016). *Agent-Based Support for Container Terminals to Make Appointments with Barges*. En Paías A., Ruthmair M., Voß S. (eds). International Conference on Computational Logistics (Computational Logistics - ICCL 2016). Lecture Notes in Computer Science, vol 9855. Springer, Cham pp: 80-95. Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-44896-1_6
294. Microcity (2017). *MicroCity - A Spatial Analysis and Simulation Framework*. DMU, Dalian Maritime University; Hayashi & Kato Lab., Nagoya University & CMS, National University of Singapore. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <http://microcity.github.io/index.html>
295. Microport (2017). *Micropor Application*. DMU, Dalian Maritime University; Hayashi & Kato Lab., Nagoya University & CMS, National University of Singapore. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <http://microcity.github.io/features.htm>
296. Minar, N.; Burkhart, R.; Langton, C. y Askenazi, M. (1996). *The swarm simulation system, a toolkit for building multi-agent simulations*. Working Paper 96-06-042, Santa Fe Institute, Santa Fe, Nuevo Mexico (Estados Unidos), Disponible en [fecha de acceso el 07.10.2016] <http://samoa.santafe.edu/media/workingpapers/96-06-042.pdf>
297. Mingming, F. (2011). *Port and Economy Relationship Analysis by System Dynamics*. 3rd International Conference on Transportation Engineering (ICTE 2011). American Society of Civil Engineers (ASCE), Chengdu (China), 23-25 de Julio, 2011 (pp. 162-167). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/41184\(419\)28](http://dx.doi.org/10.1061/41184(419)28)
298. Mock, K. J., y Testa, J.W. (2007). *An Agent-Based Model of Predator-Prey Relationships between Transient Killer Whales and Other Marine Mammals*. University de Alaska Anchorage, Anchorage, Alaska (Estados Unidos), 31 de Mayo de 2007. 38 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 28.03.2017] www.math.uaa.alaska.edu/~orca/
299. Mohring, H. (1972). *Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation*. American Economic Review 62, vol 4 (Septiembre 1972): pp: 591-604. Disponible en

-
- [fecha de acceso el 28.01.2017]
<http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/54245/1/1971-05.pdf>
300. Monostoria, L.; Váncza, J. y Kumara, S.R.T. (2006). *Agent-based systems for manufacturing*. CIRP Annals—Manufacturing Technology, vol 55(2), pp: 697–720. Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.004>
 301. Moonen, H.; Van de Rakt, B.; Miller, I.; Van Nunen, J. y Van Hillegersberg, J. (2005). *Agent technology supports inter-organizational planning in the port*. ERIM report series research in management, Erasmus Research Institute of Management. (No. ERS-2005-027-LIS,) publicado también en: de Koster, R., Delfmann, W. (eds.) *Managing Supply Chains-Challenges and Opportunities*, pp. 1–21. Copenhagen Business School Press, Copenhagen (2007). Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017]
<http://hdl.handle.net/1765/6636>
 302. Mostafavi, A.; Abraham, D.; DeLaurentis, D. y Sinfield, J. (2011). *Exploring the dimensions of systems of innovation analysis: a System of Systems framework*. IEEE Systems Journal, vol 5(2), pp:256-265. . Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/224231086_Exploring_the_Dimensions_of_Systems_of_Innovation_Analysis_A_System_of_Systems_Framework
 303. Moura, A. y Oliveira, J.F. (2005). *A GRASP approach to the Container-Loading Problem*. IEEE Intelligent Systems, vol 20(4), pp: 50-57. Disponible en [fecha de acceso el 23.02.2017] <https://www.computer.org/csdl/mags/ex/2005/04/x4050.html>
 304. Moura, A.; Oliveira, J.F. y Pimentel, C. (2013). *A Mathematical Model for the Container Stowage and Ship Routing Problem*. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research, vol 12(3), pp: 217-231. (2013). Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 23.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/257582120_A_Mathematical_Model_for_the_Container_Stowage_and_Ship_Routing_Problem
 305. Moura, A. y Bortfeldt, A. (2016). *A two-stage packing problem procedure*. International Transactions in Operational Research, vol 24(1-2), pp: 43-58. Disponible en [fecha de acceso el 23.02.2017]
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/itor.12251/abstract;jsessionid=F6465FB83865345839E5C1CD941F0D34.f01t01>
 306. MRS (2017). *Global Automated Storage and Retrieval Systems Market 2017-2021*. Market Research Repots. INforme: TNV0417190 © TechNavio. 70 páginas. Disponible

- en [fecha de acceso el 03-05-2017]
<https://www.marketresearchreports.com/technavio/global-automated-storage-and-retrieval-systems-market-2017-2021>
307. Munitic, A.; Tonko, B.; Dusan, R. y Slavko, S. (1990). *Computer simulation of shipbuilding production process management*. Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society. (1990), pp: 812-825. Disponible en [fecha de acceso el 23.11.2016]
<http://www.systemdynamics.org/conferences/1990/proceed/pdfs/muniti812.pdf>
 308. Munitic, A y Šimundić, S. (2000). *System dynamic continuous computer simulation model of the 5th phase of the shipbuilding process - "launching"*. The 14th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding - In Memoriam Prof. Leopold Sorta. Rijeka: Faculty of Technical science, University of Rijeka, 2000.
 309. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2002). *System Dynamics simulation model of the Port-Transshipments System*. Proceedings of the Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises (MITIP 2002) , (Savvona, Italia), pp: 171-176
 310. Munitic, A.; Bilic, M. y Dvornik, J. (2003a). *System Dynamics simulation and heuristic optimisation of cargo operation process in the harbours*. Nase more, vol 50(3-4), pp: 113-12
 311. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2003b). *System Dynamics modelling of material flow of the port cargo system*. Proceedings of the 21st International Conference (ISDC 2003), vol 1, pp: 97-114
 312. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2003c). *System Dynamics simulation model of the Port-Transshipments System Manager expert-logical complex fuctions: SKLOK, SKLOW and SKLOS*. Proceedings of the International Conference on Simulation and Multimedia in Engineering (ICSEE'03), Florida (Estados Unidos), vol 1, pp: 83-87.
 313. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2003d). *Shipbuilding organization simulation modelling*, Proceedings of the 21st International System Dynamics Conference 2003 (ISDC 2003), New York (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 15.02.2017]
<http://www.systemdynamics.org/conferences/2003/proceed/PAPERS/203.pdf>
 314. Munitic, A; Dvornik, J. y Slavko, S. (2003e). *System dynamics continuous computer simulation model of shipbuilding process*. Proceedings of the 1st Industrial Simulation Conference 2003, EUROSIS. (ISC 2003) vol 1, pp: 336-338

-
315. Munitic, A.; Dvornik, J. y Slavko, S. (2003f). *System dynamics continuous computer simulation model of shipbuilding process.*, The Society for Modelling and Simulation International Summer Computer Simulation Conference (SCSC 2003) (20-24 de Julio de 2003) (Montreal, Canadá). Vol 1 , pp: 1-8.
316. Munitic, A.; Dvornik, J. y Bilic, M. (2007). *Contribution to the investigation of the porttranshipment system using System Dynamics*. Proceedings of the 2nd International Conference on Ports and Waterways, 5-6 de Octubre 2007 (Vukovar, Croatia), vol 1, pp: 44-49. ISBN 978-953-243-019-6
317. Mustafee, N. y Bischoff, E.E. (2011). *A multi-methodology agent-based approach for Container Loading*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Editado por S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspace, K.P. White, y M. Fu, pp: 234 – 245. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/254050333_A_multi-methodology_agent-based_approach_for_Container_Loading
318. Najib, M.; El Fazziki, A. y Boukachour, J. (2012). *A container terminal management system*. Proceedings of the International Conference on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S, 2012. ISBN 978-88-97999-11-9; Editado por Bruzzone, Gronalt, Merkurjev, Piera y Talley; pp: 118-127
319. NetLogo (2016). *Netlogo*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
320. NetLogo (2017). *Netlogo - References*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/references.shtml>
321. Nevins, M. R.; Macal, C. M.; Love, R. y Brogen, M. J. (1998a). *Simulation, animation and visualization of seaport operations*. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International Volumen 71(2), pp: 96-106. DOI: 10.1177/003754979807100204. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979807100204>
322. Nevins, M. R.; Macal, y Joines, J.C (1998b): “A discrete-event simulation model for seaport operations”. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. Volumen 70(4), pp: 96-106. DOI:

- 10.1177/003754979807000401 Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979807000401>
323. Nicholls, S.; Amelung, B. y Student, J. (2016). *Agent-based modeling: A powerful tool for tourism researchers*. Journal of Travel Research. Publicación on-line antes de su edición el 3 de enero de 2016. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0047287515620490?journalCode=jtrb>
 324. Nidhiry, N.M. y Saravanan, R. (2014). *Scheduling optimization of a flexible manufacturing system using a modified NSGA-II algorithm*, Advances in Production Engineering & Management, vol 9(3): 107–154. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] http://apem-journal.org/Archives/2014/APEM9-3_139-151.pdf
 325. Ng, T.-S. y Lam, S.-W. (2011). *Dynamic maritime systems inquiry: The DIVER approach*. Systems Engineering, vol 14(3), pp.239–254. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sys.20175/abstract>
 326. Nilsen, K.O. y Abdus-Samad, U. (1977). *Simulation and Queuing Theory in Port Planning*. Proceedings of Annual Symposium of ASCE, Ports, vol. 77 (1977), pp: 196–211.
 327. Nobx (2012) (noticia en línea publicada el 13 de abril de 2012). *Jade Scores Port of Doha* PortsandTerminals.com. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <http://www.portsandterminals.com/jade-scores-port-of-doha/>
 328. North, M.J.; Collier, N.T. y Vos, R.J. (2006). *Experiences creating three implementations of the Repast agent modeling toolkit*. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. Vol 16(1). pp: 1–25. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://intersci.ss.uci.edu/wiki/pub/Repast10.1.1.99.9666.pdf>
 329. North, M.; Macal, C.; Aubin, J. St.; Thimmapuram, P.; Bragen, M. Hahn, J.; Karr, J.; Brigham, N.; Lacy, M. y Hampton, D. (2009). *Multi-scale Agent-based Consumer Market Modeling*. Complexity. Vol 15(5), pp: 37-47. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/220657403_Multiscale_Agent-Based_Consumer_Market_Modeling
 330. North, M.J.; Collier, N.T.; Ozik, J.; Tatara, E.R.; Macal, C.M.; Bragen, M. y Sydelko, P. (2013). *Complex adaptive systems modeling with repast symphony*. Complex Adaptive Systems Modeling 2013, Springer, Heidelberg, FRG, Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://www.casmodeling.com/content/1/1/3>

-
331. Norrie, D. H.; Fauvel, O.R. y Gaines, B.R. (1989a). *A flexible manufacturing expert system*. Report 420, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad of Calgary, Alberta (Canadá).
332. Norrie, D. H.; Fauvel, O.R. y Gaines, B.R. (1989b). *Object—oriented planning, scheduling and simulation in manufacturing systems*. Report No. 421, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad of Calgary, Alberta (Canadá)
333. Norrie, D.H.; Fauvel, O.R. y Gaines, B. R. (1990). *Object-oriented management planning systems for advanced manufacturing*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol 3(6), pp. 75–79. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1080/09511929008944468>
334. Omer, M., Mostashari, A., Nilchiani, R., y Mansouri, M. (2012). *A Framework for Assessing Resiliency of Maritime Transportation Systems*. Maritime Policy & Management: The Flagship Journal of International Shipping and Port Research, volumen 39 (2012), pp: 685-703. Disponible en [fecha de acceso el 15.02.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088839.2012.689878>
335. Oztanriseven, F.; Pérez-Lespier, L.; Long, S. y Nachtmann, H. (2014). *A Review of System Dynamics in Maritime Transportation*. Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference. Editado por Y. Guan y H. Liao. (10 páginas) Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://transportation.mst.edu/media/research/transportation/documents/publications/A%20Review%20of%20System%20Dynamics%20in%20Maritime%20Transportation.pdf>
336. Park, C. S. y Noh Y.D. (1987). *A port simulation model for bulk cargo operations*. *SIMULATION* vol 48 (6), pp: 236-246. doi>10.1177/003754978704800605. Disponible en [fecha de acceso el 18.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754978704800605?journalCode=simb>
337. Park, B.C. (1991). *Analytical models and optimal strategies for automated storage/retrieval system operations*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA; 1991. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/27539670_Analytical_models_and_optimal_strategies_for_automated_storage_retrieval_system_operations
338. Park, B.C. (1999). *Optimal dwell point policies for automated storage/retrieval systems with dedicated storage*. IIE Transactions, vol.31(10): 1011—1013. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] DOI: 10.1023/A:1007687818042

339. Park, B.C. (2001). *An optimal dwell point policy for automated storage/retrieval systems with uniformly distributed, rectangular racks*. International Journal of Production Research, vol. 39(7): 1469-1480. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540010023583>
340. Park, B.C., Foley, R.D., White, J.A. y Frazelle E.H. (2003). *Dual command travel times and miniload system throughput with turnover-based storage*. IIE Transactions, vol. 35 (4): 343-355. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://dx.doi.org/10.1080/07408170304375>
341. Park, B.C., Foley, R.D. y Frazelle, E.H. (2006a). *Performance of miniload systems with two-class storage*. European Journal of Operational Research, vol.170 (1): 144-155. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.057>
342. Park, N.-K., D.S. Moony Lim, C.-K. (2012a). *Port Choice Model of Transshipment Cargo Using System Dynamics*. Maritime Logistics Contemporary Issues (Editado por D.-W. Song, y P. Panayides),. Emerald Group Publishing Limited. pp. 69-90 (ISBN 9781780523408) Disponible en [fecha de acceso el 25.02.2017] <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/9781780523415-005>
343. Parker, M. (1999). *Ascape: an Agent Based Modeling Environment in Java*. Proceedings of Agent Simulation: Applications, Models, and Tools. University of Chicago. 15-16 Octubre de 1999. Editado por Charles M. Macal y David Sallach. Pp: 149-174. Disponible en [fecha de acceso el 25.02.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.8708&rep=rep1&type=pdf>
344. Parker, M. (2000). *Ascape: Abstracting Complexity*. Proceedings of the Swarmfest 2000. Natural Resources and Environmental Issues, Vol. 8, Artículo 5. Disponible en [fecha de acceso el 25.02.2017] <http://digitalcommons.usu.edu/nrei/vol8/iss1/5>
345. Parker (2001). *What is Ascape and Why Should You Care?*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 4(1), Recurso en línea (ISSN 1460-7425). Disponible en [fecha de acceso el 25.02.2017] <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/1/5.html>
346. Parker, D.C.; Manson, S.M.; Janssen, M.A.; Hoffmann, M.J. y Deadman, P. (2003). *Multi-agent systems for the simulation of land-use and landcover change: A review*. Annals of the Association of American Geographers, vol 93(2), pp: 314–337. Disponible en [fecha de acceso el 25.02.2017] http://www.csiss.org/events/other/agent-based/papers/maslucce_overview.pdf (previamente presentado en Special Workshop on

- Agent-Based Models of Land Use, 4-7 Octubre 2002, Irvine, California (Estados Unidos).
347. Parker J., y Epstein, J. (2011). *A Distributed Platform for Global-scale Agent-based Models of Disease Transmission*. Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), Association for Computing Machinery (ACM). Volumen 22(1), artículo 2. Disponible en [fecha de acceso el 24.03.2017] http://www.pacercenter.org/media/18834/parker%20epstein%20gsam.pdf?origin=publication_detail
348. Parola, F. y Sciomachen, A. (2005). *Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models*. International Journal of Production Economics 97(1), pp:75-88 · Febrero 2005. DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.06.051. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222780369_Intermodal_container_flows_in_a_port_system_network_Analysis_of_possible_growths_via_simulation_models
349. Parreño, F.; Alvarez-Valdes, R.; Oliveira J.F. y Tamarit J.M. (2007). *A maximal-space algorithm for the container loading problem*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia. (Burjassot, Valencia, España). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.uv.es/sestio/TechRep/tr03-07.pdf>
350. Pawlas, K. y Zall, D. (2012). *Analysis of Forecasting Methods and Applications of System Dynamics and Genetic Programming: Case Studies on Country Throughput*. Master Thesis para la obtención del grado de Master of Science in Computer Science. School of Computing. Blekinge Institute of Technology - Karlskrona (Suecia). 90 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] www.diva-portal.org/smash/get/diva2:829407/FULLTEXT01.pdf
351. Pin, F.G. y Watanabe, Y. (1993). *Driving a car using reflexive fuzzy behaviors*. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 2: 1425-1430. 28 Marzo – 1 Abril 1993, San Francisco (California, Estados Unidos) Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: 10.1109/FUZZY.1993.327602
352. Pisinger, D. (2002). *Heuristics for the container loading problem*. European Journal of Operational Research, vol 141(2); pp: 382-392. Disponible en [fecha de acceso el 10.12.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00132-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00132-7)
353. PORTeC (2017). *Limen: Port Simulator*. Centre of Transports, Department of Civil and Environmental Engineering. Imperial Collage. © 2017 Imperial College London,

- Londres (Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso el 27.10.2016] <http://www.imperial.ac.uk/transport-studies/port-operations/research/>
354. Port Technology (2009) (noticia en línea publicada el 10 de junio de 2009): *Messina Line selects Jade Master Terminal*. Port Technology (© Maritime Information Services Ltd). Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] http://www.porttechnology.org/news/messina_line_selects_jade_master_terminal
 355. Pradhana, S.K.; Parhib, D.R. y Pandac A.K. (2009). *Fuzzy logic techniques for navigation of several mobile robots*. Applied Soft Computing, vol 9(1): 290–304. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2008.04.008>
 356. Puckett, R. R. (2009). *Multi-Agent Crowd Behavior Simulation for Tsunami Evacuation*. Master Thesis, Department of Information and Computer Sciences, University of Hawaii, Hawaii (Estados Unidos). 37 páginas Disponible en [fecha de acceso el 10.02.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.8632&rep=rep1&type=pdf>.
 357. Ramani, K. V. (1996). *An Interactive Simulation Model for the Logistics Planning of Container Operations in Seaports*. Simulation, Volumen 66 (5), pp: 291-300. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979606600503>
 358. Rand, W.M. y Rust, R.T. (2011). *Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor*. International Journal of Research in Marketing, vol 28(3), pp: 181–193. Disponible bajo en [fecha de acceso el 24.10.2016] https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1818543
 359. Randers, J., y Gölluke, U. (2007). *Forecasting Turning Points in Shipping Freight Rates: Lessons from 30 Years of Practical Effort*. System Dynamics Review, vol 23(2-3), pp: 253-284. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sdr.376/abstract>
 360. Rebollo, M.; Julian, V., Carrascosa, C. y Botti, V. (2000). *A Multi-Agent System for the Automation of a Port Container Terminal*. Proceeding of the 4th Autonomous Agents 2000 Workshop on Agents in Industry. 3-7 de Junio de 2000-. Barcelona (España). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://users.dsic.upv.es/~vinglada/download/agentw.pdf>
 361. Remus, W. y O'Connor, M. (2001). *Neural network models for time series forecasting*. En Armstrong, J.S., ed, Principles of Forecasting: A Handbook for reasearchers and

-
- Practicioners, Kluwer, Dordrecht (850 páginas), pp 245–256. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.springer.com/us/book/9780792379300>
362. Repast (2016). *Repast*. Argonne National Laboratory, Illinois (Estados Unidos) Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] http://repast.sourceforge.net/repast_simphony.php
363. Repast (2017a). *Repast. We would like to hear from you!*. Argonne National Laboratory, Illinois (Estados Unidos) Disponible en [fecha de acceso el 13.01.2017] <https://repast.github.io/papers.html>
364. Repast (2017b). *The repast suite*. Argonne National Laboratory, Illinois (Estados Unidos) Disponible en [fecha de acceso el 13.01.2017] <https://repast.github.io/>
365. Resnick (1996). *StarLogo: An Environment for Decentralized Modeling and Decentralized Thinking*. MIT Media Laboratory, Cambridge, Massachusets (Estados Unidos). Presentado en Proceeding CHI '96 Conference Companion on Human Factors in Computing Systems, Vancouver, British Columbia (Canada), 13 – 18 de abril de 1996, pp: 11-12 Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]. http://www.sigchi.org/chi96/proceedings/demos/Resnick/mjr_txt.htm
366. Revetria R.; Oliva, F. y Mosca, M. (2008). *Modelling of Voltri Terminal Europe in Genoa Using System Dynamic Model Simulation*. Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSE '08). Disponible en [fecha de acceso el 26.02.2017] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2008/venice/icosse/icosse67.pdf>
367. Ridolfi, A.; Allotta, B.; Costanzi, R. y Pugi, L. (2014). *Fast Prototyping of a Scaled AGV for the Testing of Stability Control for Industrial Vehicles*. Proceedings of the European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC 2014), Milán (Italia), pp: 202-206. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: [10.1109/EDERC.2014.6924388](https://doi.org/10.1109/EDERC.2014.6924388)
368. Rizzoli, A.; Gambardella, L.M. y Bontempi, G. (1997). *Simulation of an Intermodal Container Terminal to Assist the Management in the Decision Making Process*. Proceedings of 9th International Congress on Modeling and Simulation, Hobart, Tasmania. Página 1508-1512. Disponible en [fecha de acceso el 27.09.2016] https://www.researchgate.net/publication/200058815_Simulation_of_an_intermodal_container_terminal_to_assist_the_management_in_the_decision_making_process

369. Roodbergen, K.J. y Vis, I. F. A. (2009). *A survey of literature on automated storage and retrieval systems*. European Journal of Operational Research, vol. 194(2): 343–362. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://www.roodbergen.com/publications/EJOR2009.pdf>
370. Rouwenhorst, B., Reuter, B., Stockrahm, V., Van Houtum, G.J., Mantel, R.J. y Zijm, W.H.M. (2000). *Warehouse design and control: framework and literature review*. European Journal of Operational Research, vol. 122 (1): 515-533. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/222746389_Warehouse_design_and_control_Framework_and_literature_review
371. Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S.S. y Malmberg, C.J. (2012). *Performance analysis and design trade-offs in warehouses with autonomous vehicle technology*. IIE Transactions, vol. 44(12): 1045-1060. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0740817X.2012.665201>
372. Saanen, Y. (2002). *The application of advanced simulations for the engineering of logistics control systems*. Building Blocks for Effective Telematics Application Developement and Evaluation. EEditado por A. Verbraeck, y A. Dahanayake, pp: 179–192. Delft: Delft University of Technology.
373. Saanen, Y. (2003). *The design and assessment of next generation automated container terminals*. Proceedings of 15th European Simulation Symposium, Delft, (Holanda), pp:1-8. Disponible en [fecha de acceso el 30.09.2016] https://www.tba.nl/resources/press+section/publications/2003_terminaldesign.pdf
374. Saanen, Y. (2005). *Using emulation to improve the performance of your TOS*. Presentado en Automation in Port Operations, 26–27 de Septiembre de 2005, Amsterdam (Holanda) y recogido en Port Technology International – Container Handling, pp: 77-80. Disponible en [fecha de acceso el 29.03.2017] https://www.tba.nl/resources/press+section/publications/using_emulationto_improve_the_performance_of_your_tos.pdf
375. Saanen, Y. (2008). *Container terminal simulation software improves operating efficiency*. Freight International 2007. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] <https://www.copybook.com/companies/tba-bv/articles/playground-for-container-terminal-operations>
376. Shahidi, R. (1988). *Mobile robot navigation using potential functions*. Master of Science Thesis, MS. 89-3. (Dirigida por M. Shayman y P.S. Krishnaprasad). Universidad de

-
- Meryland. 71 páginas. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] http://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/4950/MS_89-3.pdf?sequence=1&isAllowed=y
377. Shahidi, R. (1991). *Mobile robot navigation using potential functions*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp: 2047-2053. 9-11 de abril de 1991. Sacramento (California, Estados Unidos). Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: [10.1109/ROBOT.1991.131928](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1991.131928)
378. Sankaranarayanan, K. (2011). *Study on behavioral patterns in queuing: Agent based modeling and experimental approach*. PhD Dissertation, Facultad de Económicas, Institute of Management, Università della Svizzera Italiana (Universidad de Lugano, Italia). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <https://doc.rero.ch/record/27284/files/2011ECO006.pdf>
379. Santella, N., Steinberg, L. J., & Parks, K. (2009). *Decision Making for Extreme Events: Modeling Critical Infrastructure Interdependencies to Aid Mitigation and Response Planning*. Review of Policy Research, Volume 26(4), pp:409-422. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1541-1338.2009.00392.x/abstract>
380. Saranen, J. y Hilmola, P.P. (2010). *Intermodal transportation in emergency situations in the Gulf of Finland*. Department of Industrial Engineering and Management. Kouvola Research Unit. Research Report 223 - Lappeenranta University of Technology. 172 páginas 8 ISBN 978-952-214-935-0; ISBN 978-952-214-936-7 (pdf); ISSN 1459-3173) Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] http://www.stoca-simulation.fi/files/download/Research_Report_223.pdf
381. Sarker, B.R. y Babu, P.S. (1995). *Travel time models in automated storage/retrieval systems: a critical review*. International Journal of Production Economics, vol.40(1): 173-184. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00075-2](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00075-2)
382. Sauve, B. y Collinot, A. (1986). *An expert system for scheduling in a flexible manufacturing system*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, volumen 3(2), pp: 229-233. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/0736-5845\(87\)90106-2](http://dx.doi.org/10.1016/0736-5845(87)90106-2)
383. Saxena, S.K. (1996). *Object Oriented Simulation of Flexible Manufacturing System for comparison of Dispatching Rules*. Department of Industrial and Management Engineering. (Indian Institute of Technology Kanpur). Master Thesis. 117 Páginas.

- Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://www.dli.ernet.in/bitstream/handle/2015/195161/Object-Oriented-Simulation-Of-Flexible-Manufacturing-System-For-Comparison-Of-Dispatching-Rules.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
384. Schade, B. y Schade, W. (2005). *Evaluating Economic Feasibility and Technical Progress of Environmentally Sustainable Transport Scenarios by a Backcasting Approach with ESCOT*. Transport Reviews, Vol. 25(6), pp: 647-668. Disponible en [fecha de acceso el 11.11/2016] <http://depts.washington.edu/sce2003/Papers/168.pdf>
 385. Schut, M.C.; Kentrop, M.; Leenaarts, M.; Melis, M. y Miller, I. (2004). *Approach: decentralised rotation planning for container barges*. En: de Mántaras, R.L., Saitta, L. (eds.) Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI 2004, pp. 755–759. IOS Press (2004). Disponible en [fecha de acceso el 26-04-2017] <http://www.frontiersinai.com/ecai/ecai2004/ecai04/pdf/p0755.pdf>
 386. Sebo, D. (1995). *A system dynamics approach to intermodalism at the Port of Lewiston*. Technical Report: INEL--96/0274. Idaho National Engineering Laboratory. Idaho (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 03.02.2017] <http://www.osti.gov/scitech/biblio/367249>.
 387. Sgouridis, S.P y Angelides, D.C. (2002). *CEPM 2: simulation-based analysis of handling inbound containers in a terminal*. Proceedings of the 34th conference on Winter simulation: Exploring new frontiers (2002). Editado por E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, y J. M. Charnes, pp: 1716-1724. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016]. <http://www.informs-sim.org/wsc02papers/235.pdf>
 388. Sha, M. y Huang, X. (2010). *A system dynamics model for port operation based on time, quality and profit*. International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management, 2010, vol 3. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 03.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/224136597_A_system_dynamics_model_for_port_operation_system_based_on_time_quality_and_profit.
 389. Shabayek, A. y Yeung, W. (2002). *A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong*. European Journal of Operational Research Volumen 140 (2002), pp: 1–11. Disponible en [fecha de acceso el 24.10.2016] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.472.4471&rep=rep1&type=pdf>
 390. Sharif, O.; Huynha, N.; Chowdhury, M. y Vidal, J.M. (2012). *An Agent-Based Solution Framework for Inter-Block Yard Crane Scheduling Problems*. International Journal of

-
- Transportation Science and Technology. Volumen 1(2), pp: 109–130. Disponible en [fecha de acceso el 03.03.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043016301538>
391. Shen, W. y Norrie, D.H. (1999). *Agent-based systems for intelligent manufacturing: A state-of-the-art survey*. Knowledge and Information Systems, vol 1(2), pp: 129–156. Disponible en [fecha de acceso el 03.03.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/BF03325096>
392. Silberholz, M. B.; Golden, B. L. y Baker, E. K. (1991). *Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals*. Computers and Operations Research, vol 18 (5), pp: 433 – 452. Disponible en [fecha de acceso el 02.04.2017] [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(91\)90020-R](https://doi.org/10.1016/0305-0548(91)90020-R)
393. Silva, V.M., Coelho, A.S., Novaes, A.G., & Lima, O.F.Jr. (2011). *Remarks on Collaborative Maritime Transportation's Problem Using System Dynamics and Agent Based Modeling and Simulation Approaches*. IFIP Advances in Information and Communication Technology y Working Conference on Virtual Enterprises PRO-VE 2011: Adaptation and Value Creating Collaborative Networks. Vol 1, pp: 245-252. Disponible en [fecha de acceso el 02.11.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23330-2_27
394. Simio (2017). *SIMIO Forward Thinking*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pennsylvan, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 25.01.2017] <http://www.simio.com>
395. Simpson, J. y Dagli, C. (2008). *System of Systems: power and paradox*. Proceedings of the IEEE International Conference on System of Systems Engineering, Junio 2008, pp.1-5,. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/224362612_System_of_systems_Power_and_paradox
396. Sinha-Ray, P., J. Carter, T. Field, J. Marshall, J. Polak, K. Schumacher, D. Song, J. Woods, y J. Zhang. (2003). *Container World: Global agent-based modelling of the container transport business*. Proceedings of the 4th Workshop on Agent-Based Simulation, Edited by M.-M. Seidel. SCS Europe BVBA. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/12836.PDF>
397. Smith, E.R. y Conrey, F.R. (2007). *Agent-based modeling: A new approach for theory building in social psychology*. Personality and Social Psychology Review. Vol 11(1), pp: 87–104. Disponible en [fecha de consulta 12.01.2017]. <http://www.indiana.edu/~smithlab/pdfs/SmithConreyABM.pdf>

398. Song, K.T. y Tai, J.C. (1992). *Fuzzy navigation of a mobile robot*. Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; 7-10 de Julio de 1992. Raleigh, (Carolina del Norte, Estados Unidos) pp. 621-627. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] [doi: 10.1109/IROS.1992.587405](https://doi.org/10.1109/IROS.1992.587405)
399. South Port (2017). *Container Terminal*. South Port NZ Ltd. Island Harbour, Bluff 9814, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <https://southport.co.nz/facilities-and-services/container-terminal>
400. Standish, R.K. (1998). *Cellular Ecolab*. Complex Systems '98, pp: 1-14. Editado por Standish *et al.* Disponible en línea en High performance Computing Support Unit. University of New South Wales, Sidney (Australia). Disponible en [fecha de acceso el 25.03.2017] https://www.researchgate.net/publication/2490765_Cellular_Ecolab
401. Standish, R.K. (2000). *Ecolab 4*. Applied Complexity: From Neural Networks to Managed Landscapes. Editado por S. Halloy y T. Williams, T. New Zealand Institute for Crop and Food Research, (Christchurch, Nueva Zelanda), pp: 156-163. Disponible en [fecha de acceso el 25.03.2017] <http://www.hpcoders.com.au/docs/ecolab4.pdf>
402. Standish, R.K. y Leow, R. (2003). *EcoLab: Agent Based Modeling for C++ programmers*. Proceedings SwarmFest 2003, pp_ 1-5 Disponible en [fecha de acceso el 25.03.2017] <https://arxiv.org/pdf/cs/0401026.pdf>
403. Standish, R.K. (2008). *Going Stupid with EcoLab*. Simulation, vol 84, pp: 611-618. Disponible en [fecha de acceso el 25.03.2017] <https://arxiv.org/pdf/cs/0612014.pdf>
404. Sugeno, M. y Nishida, M. (1985). *Fuzzy control of model car*. Journal of Fuzzy Sets and Systems, vol 16(2): 103-113. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] [doi>10.1016/S0165-0114\(85\)80011-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(85)80011-7).
405. Sun, Z.; Tan, K.C.; Lee, L.H. y Chew,, E.P. (2013). *Design and evaluation of mega container configurations. An integrated simulation framework*. Simulation, vol 89, pp: 684-692. Disponible en (fecha de acceso el 12.12.2016) <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0037549712475097?journalCode=simb>
406. Swaminathan, J.M.; Smith, S.F. y Sadeh, N.M. (1998). *Modeling supply chain dynamics: A multiagent approach*. Decision Sciences 29(3), pp: 607-632. Disponible en [fecha de acceso el 13.03.2017] <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/user/sfs/www/papers/dsj04.pdf>
407. Taboun , S.M. y Bhole, S.D. (1993). *A simulator for an automated warehousing system*. Computers & Industrial Engineering, vol. 24(2): 281-290. Disponible en [fecha de acceso el 29-04-2017] [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(93\)90014-O](https://doi.org/10.1016/0360-8352(93)90014-O)

-
408. Tahar, R.M. y Hussain, K. (2000). *Simulation and analysis for the Kelang Container Terminal operations*. Logistics Information Management, Vol. 13(1), pp: 14-20. (ISSN: 0957-6053). Disponible en [fecha de acceso el 03.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/235317807_Simulation_and_analysis_for_the_Kelang_Container_Terminal_operations
409. TBA (2017a). *TBA TIMESQUARE*. Delft TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/simulation/timesquare/>
410. TBA (2017b). *TBA TRAFALQUAR*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/simulation/trafalquar/>
411. TBA (2017c). *TBA TRAFALQUAR - Bulk*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/simulation/bulk/>
412. TBA (2017d). *Gain Control over TOS implementation: TBA Controls TOS-testing*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/emulation/tos-testing/>
413. TBA (2017e). *TBA Timeline*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/company-info/history/>
414. TBA (2017f). *About TBA*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/company-info/history/>
415. TBA (2017g). *Operational training focused on performance: TBA's Virtual Reality TOS*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/emulation/training/>
416. TBA (2017h). *System approach to over 10% performance gain: TBA Controls TOS-tuning*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/emulation/tos-tuning/>
417. Terno, J.; Scheithauer, G.; Sommerwei, U. y Riehme, J. (2000). *An Efficient Approach for the Multi-Pallet Loading Problem*. European Journal of Operational Research vol 123(2), pp:372-381. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00263-5. . Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017]

https://www.researchgate.net/publication/4868638_An_Efficient_Approach_for_the_Multi-Pallet_Loading_Problem

418. Tesfatsion, L. y Judd, K.L. (2006). *Handbook of Computational Economics, Volume II: Agent-Based Computational Economics*. Elsevier / North-Holland: Amsterdam (Holanda). 904 páginas. ISBN-10: 0444512535 e ISBN-13: 978-0444512536
419. TGI (2017a). *OSCAR © Maritime Software*. TGI Maritime Software. Dunkerke (Francia) Disponible en [fecha de acceso el 29.03.2107] <https://www.tgims.com/oscar-en/>
420. TGI (2017b). *CARROL © Maritime Software*. TGI Maritime Software. Dunkerke (Francia) Disponible en [fecha de acceso el 29.03.2107] <https://www.tgims.com/carrol-en/>
421. Thiers, G. F. y Janssens, G. K. (1998). *A port simulation model as a permanent decision instrument*. *SIMULATION* 71 (2), pp: 117-25. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220165147_A_Port_Simulation_Model_as_a_Permanent_Decision_Instrument
422. Thurston, T. y Hu, H. (2002). *Distributed Agent Architecture for Port Automation*. Proceedings of the 26th International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2002), Oxford, Reino Unido. pp.81-90. Disponible en [fecha de acceso el 22.02.2017] <http://csee.essex.ac.uk/staff/hhu/Papers/IEEE-COMPSAC-2002-81-87.pdf>.
423. Tilove, R.B. (1990). *Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol 1: 566-571. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: [10.1109/ROBOT.1990.126041](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126041)
424. Törnquist, J. y Davidsson, P. (2002). *Multi-Agent System approach to train delay handling*. Proceedings of Agent Technologies in Logistics Workshop, the 15th European Conference on Artificial Intelligence, Lyon (Francia). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:838067/FULLTEXT01.pdf>
425. TOTAL SOFT BANK (2010). *O-cps. 2010*. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] http://www.tsb.co.kr/RBS/Fn/FreeForm/View.php?RBIIdx=Ver1_44
426. Towill, D.R.; Naim, M.M. y Wikner, J. (1992). Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, col 22(5), pp: 3-13.). Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/09600039210016995>

-
427. Tuğcu, S. (1983). *A Simulation Study on the Determination of the Best Investment Plan for Istanbul Seaport*. The Journal of the Operational Research Society, vol 34 (6), pp: 479-487. Disponible en [fecha de acceso el 25.03.2016] <http://link.springer.com/article/10.1057/jors.1983.115>
428. van Dam, K.H.; Ottjes, J.A.; Lodewjks, G. y Wagennar, R.W.(2004). Intelligent infrastructures: distributed intelligence in transport system control - an illustrative example. *Proceedings of the Systems, Man and Cybernetics, 2004*. 10-13 de Octubre de 2004, La Haya (Holanda) Volume: 5. DOI: 10.1109/ICSMC.2004.1401265
429. van Dam, K. H.; Adhitya, A.; Srinivasan, R. y Lukszo, Z. (2008). *Benchmarking numerical and agentbased models of an oil refinery supply chain*. Computer-Aided Chemical Engineering 25 (2008), pp: 623-628. Disponible en [fecha de acceso el 21.03.2017] [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(08\)80109-5](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(08)80109-5)
430. Van den Berg, J.P. (2002). *Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system*. International Journal of Production Economics, vol. 76 (1): 13-25. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00149-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00149-9)
431. Van den Berg, J.P. y Gademann, A.J.R.M. (2000). *Simulation study of an automated storage/retrieval system*. International Journal of Production Research , vol. 38(6): 1339-1356. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/232976732_Simulation_study_of_an_automated_storage_retrieval_system
432. Vasili, M.R., Tang, S.H. y Vasili, M. (2012). Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies. Capítulo 8 en *Warehousing in the Global Supply Chain*, pp 159-209. Springer-Verlag London Limited. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://iauln.ac.ir/dorsapax/userfiles/Sub0/VasiliFPSpringerChapter8.pdf>
433. Versiant (2017). *Navis – TOS Support*. Versiant Corporation Charlotte, Carolina del Norte (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 29.03.2107] <http://www.versiant.com/marine-terminal-solutions/navis-tos-support>
434. Vidal, J.M. y Huynh, N. (2010). *Building Agent-Based Model of Seaports Container Terminal*. Proceedings of 6th Workshop on Agents in Traffic and Transportation, Kluegl, Ossowski, Chaib-Draa and Bazzan (eds.), (10 páginas) 11 de Mayo de 2010, Toronto, Canada. Disponible en [fecha de acceso el 15.03.2017] <http://jmvidal.cse.sc.edu/papers/vidal10a.pdf>

435. Videira, N.; Antunes, P.; Santos, R. y Gamito, S. (2003). *Participatory modelling in environmental decision-making: the Ria Formosa natural park case study*. Journal of Environmental Assessment Policy and Management, vol 5(3), pp: 421–447. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S1464333203001371>
436. Videira, N.; Antunes, P. y Santos, R. (2009). *Scoping river basin issues with participatory modelling: the Baixo Guadiana experience*. Ecological Economics, vol 68(4), pp: 965–978. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.11.008>
437. Videira, N.; Antunes, P.; Santos, R. y Lopes, R. (2010). *A participatory modelling approach to support integrated sustainability assessment processes*. Systems Research and Behavioral Science 27(4), pp: 446–460. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sres.1041/full>
438. Videira, N.; Lopes, R.; Antunes, P.; Santos, R. y Casanova, J.L. (2012). *Mapping Maritime Sustainability Issues with Stakeholder Groups*. Systems Research and Behavioural Science Syst. Res. vol 29(6), pp: 596-619. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sres.2141/abstract>
439. Vladimir, V.N. y Vapnik, V. (1995). *The nature of statistical learning theory*. Springer Science & Business Media, New York (Estados Unidos). 314 páginas. ISBN 978-1-4419-3160-3 Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.springer.com/us/book/9780387987804>
440. von Altrock, C.; Krause, B. y Zimmermann, H.-J. (1992a). *Advanced Fuzzy logic control technologies in automotive applications*. Proceedings of the IEEE Conference on Fuzzy System, 8-12 Marzo 1992, San Diego (California, Estados Unidos). vol 1: pp. 835-842. (ISBN: 0-7803-0236-2). Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] DOI: [10.1109/FUZZY.1992.258767](https://doi.org/10.1109/FUZZY.1992.258767)
441. von Altrock, C.; Krause, B. y Zimmermann, H.-J. (1992b). *Advanced fuzzy logic control of a model car in extreme situations*. Journal of Fuzzy Sets and Systems, v.48 (1): 41-52. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] [doi>10.1016/0165-0114\(92\)90250-8](https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90250-8)
442. Wagner, H.F. (2014). *ContMAS*. Universidad de Duisburg-Essen (Essen, Alemania). © Copyright 2010-2014 Hanno - Felix Wagner. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] http://www-stud.uni-due.de/~sehawagn/contmas/page/index_en.html
443. Wang, Z.-J.; Li, K. y Levy, J.K. (2008). *A heuristic for the container loading problem: A tertiary-tree-based dynamic space decomposition approach*. European Journal of

-
- Operational Research, vol 191(1), pp:86-99. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/223434812_A_heuristic_for_the_container_loading_problem_A_tertiary-tree-based_dynamic_space_decomposition_approach
444. Wang, Y. (2010). *Analysis Of Port Logistics Alliance System Based On System Dynamic*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.globethesis.com/?t=2189360275487279>
445. Wang, Y.; Chou, C.-C. y Yeo, G.-T. (2013a). *Application and improvement of a System Dynamics model to forecast the volume of containers*. Journal of Applied Science and Engineering, Volumen 16(2), pp: 186-196. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/16-2/10-IE10011.pdf>
446. Weaver, P. y Rotmans, J. (2006). *Integrated Sustainability Assessment: what is it, why do it, and how?*. International Journal of Innovation and Sustainable Development, vol 1(4), pp: 284–303 Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJISD.2006.013732?journalCode=ijisd>
447. Weaver, P. y Jordan, A. (2008). *What roles are there for sustainability assessment in the policy process?*. International Journal of Innovation and Sustainable Development, vol 3(1-2), pp: 9–32. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJISD.2008.018192>
448. Wäscher, G.; Haußner, H. y Schumann, H. (2007). *An improved typology of cutting and packing problems*. European Journal of Operational Research, Vol. 183(3), pp:1109-1130. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047>
449. Wijnolst, N. (1975). *The Dynamics of National Fleet Development*. Dynamica vol 2(1), pp: 3-10. Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016] <http://www.systemdynamics.org/dynamica/articles/21/3.pdf>
450. Wikipedia POS (2016). *Port of Suzhou*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Port_of_Suzhou
451. Wikipedia Software SD (2017). *List of system dynamics software*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] http://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_system_dynamics_software

452. Wikipedia – Swarm (2017). *Swarm (Simulation)*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] [https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_\(simulation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_(simulation))
453. Wikipedia – Swarm Development Group (2017). *Swarm Development Group*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] http://www.swarm.org/wiki/Swarm_Development_Group
454. Wilensky, U. (1999). *NetLogo*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso el 12.01.2017] <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
455. Wilensky, U. (2012): *NetLogo*. Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University.
456. Wilensky, U. y Rand, W. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social and Engineered Complex Systems with NetLogo*. MIT Press: Cambridge, Massachusets (Estados Unidos). ISBN-10: 0262731894 e ISBN-13: 978-0262731898. 504 Páginas.
457. Winikoff, M.; Wagner, H.-F.; Young, T.; Cranefield, S.; Jarquin, R.; Li, G.; Martin, B. y Unlan, R. (2011). *Agent-Based Container Terminal Optimisation*. Proceedings of the 9th German Conference on Multi-Agent System Technologies (MATES 2011), Leipzig (Alemania), 6-7 de Octubre de 2011. INcluido en Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Editado por F. Klügl y S. Ossowski). 197 páginas. ISBN 978-3-642-24602-9. DOI 10.1007/978-3-642-24603-6. pp:137-148. Disponible en [fecha de acceso el 25.04.2017] http://www-stud.uni-due.de/~sehawagn/contmas/file/abcto_mates.pdf
458. Wittmann, T. (2008). *Agent-Based Models of Energy Investment Decisions*. ISBN 978-3-7908-2003-4 Disponible en [fecha de acceso el 25.10.2016]. Editado por Physica-Verlag Heidelberg. 113 páginas. <http://www.springer.com/br/book/9783790820034>
459. WorldCargo (2007) (noticia en línea publicada en octubre 2007) *JADE multi-terminal TOS goes live*. World Cargo News. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] http://www.worldcargonews.com/secure/assets/nf20071123.146069_4746666512ab2.pdf
460. WorldCargo (2014) (noticia en línea publicada en junio 2014) *Two more opt for Jade TOS*. World Cargo News. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <http://www.worldcargonews.com/htm/n20140803.890263.htm>

-
461. World Shipping Council (2017). *Top 50 World Container Ports*. World Shipping Council Partners in Trade Disponible en [fecha de acceso el 03.03.2017] <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/top-50-world-container-ports>
462. Wu, K.-K.; Chen, C.-H., Ko, J.-M. y Lee, J.-D. (1999). *Path planning and prototype design of an AGV*. Mathematical and Computer Modelling, vol. 30(7-8): 147-167. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(99\)00171-5](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(99)00171-5)
463. Wurzer, G.; Kowarik, K. y Reschreiter, H. (2015). *Agent-Based Modeling and Simulation in Archaeology*. Springer: New York. 978 ISBN -3-319-00007-7. 269 Páginas. Disponible en [fecha de acceso el 01.11.2016] <http://www.springer.com/cn/book/9783319000077>
464. Xiaodong, L.; Zhao, B.; Li, B. y Wang, N. (2010). *A System Dynamics Model of the Interaction between Port and City Based on the Green Concept*. Proceedings of the ICLEM 2010 - Logistics For Sustained Economic Development: Infrastructure, Information, Integration. Vol I - Logistics Policy and Strategy, pp. 681-688, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/41139\(387\)95](http://dx.doi.org/10.1061/41139(387)95).. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41139%28387%2995>
465. Xing S. (2012). *Research On The Regional Economic Contribution Of Port Of Tianjin* Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335455698>
466. Yang, Y. (2007). *Study on the impact of port for regional economy based on System Dynamics Model*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2179360182972089>
467. Yang, X.J. (2012). *Port Logistics Strategic Alliance Research*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335455484>
468. Yang, P., Miao, L., Xue, Z. y Qin, L. (2014). *Optimal storage rack design for a multi-deep compact AS/RS considering the acceleration/deceleration of the storage and retrieval machine*. International Journal of Production Research, 2014. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207543.2014.942441>

469. Yeo, G.; J. Pak y Z. Yang (2013). *Analysis of dynamic effects on seaports adopting port security policy*. Transportation Research Part A. Volumen 49(2013), pp: 285–301. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856413000463>
470. Yen, J. y Pfluger, N: (1995). *A fuzzy logic based extension to Payton and Rosenblatt's command fusion method for mobile navigation*. Transactions on Systems Man and Cybernetics, vol. 25(6): 971-978. Disponible en [fecha de consulta 04.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/3114561_Fuzzy_logic_based_extension_to_Payton_and_Rosenblatt's_command_fusion_method_for_mobile_robot_navigation
471. Yin, Y. -L. y Rau, H. (2006). *Dynamic selection of sequencing rules for a class-based unit-load automated storage and retrieval system*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 29 (11-12): 1259–1266. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] DOI: 10.1007/s00170-005-0005-1
472. Yu, B.; C. Zhang; L. Kong; H.-L Bao; W.-S. Wang; S. Ke y G. Ning (2014). *System dynamics modeling for the land transportation system in a port city*. Simulation, vol 90(6), pp: 706-716. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://sim.sagepub.com/content/early/2014/05/14/0037549714533619>.
473. Yun, W.Y. y Choi, Y.S. (1999). *A simulation model for container-terminal operation analysis using an object oriented approach*. International Journal of Production Economics, Vol. 59 (1-3), pp: 221-230. Disponible en [fecha de acceso el 20.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527398002138>
474. Zellner, M.L. (2008). *Embracing complexity and uncertainty: The potential of agent-based modeling for environmental planning and policy*. Planning Theory & Practice vol 9(4), pp: 437–457. . Disponible en [fecha de acceso el 15.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/14649350802481470>
475. Zhang, L., Krishnamurthy, A., Malmborg, C.J. y Heragu, S.S. (2009). *Variance-based approximations of transaction waiting times in autonomous vehicle storage and retrieval systems*. European Journal of Industrial Engineering, vol.3(2): 146-168. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] https://www.researchgate.net/publication/46513853_Variance-based_approximations_of_transaction_waiting_times_in_autonomous_vehicle_storage_and_retrieval_systems
476. Zhang, M. (2010). *Study on the Relationship between the Development of Port Industry and City Based on Green Conception*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis

- ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189360275453580>.
477. Zhao, B. (2009). *Study on Green Contribution of Port to City Based on System Dynamics*. Editado por Economic Papers ©. Recurso en red (115 páginas). Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016] <http://www.economics-papers.com/study-on-green-contribution-of-port-to-city-based-on-system-dynamics.html>
478. Zhao, X.; Bennell, J.A.; Bektaş, T. y Dowsland, K. (2014). *A comparative review of 3D container loading algorithms*. International Transaction in Operational Research, vol 23 (1-2); pp: 287-320. Disponible en [fecha de acceso el 26.10.2016] Zhou, Z.; Chan, W.K. y Chow, J.H. (2007). *Agent-based simulation of electricity markets: a survey of tools*. Artificial Intelligence Review. Vol. 28(4); pp: 305–342. Disponible en [fecha de acceso el 28.01.2017] <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ABMElectricMarketSimulators.ZZhouEtAl2007.pdf>
479. Zollinger, H. (1999). *AS/RS application, benefits and justification in comparison to other storage methods: A white paper*. Automated Storage Retrieval Systems Production Section of the Material Handling Industry of America. 24 páginas. Disponible en [fecha de acceso el 03-05-2017] <http://www.mhi.org/downloads/industrygroups/asrs/technicalpapers/asrswhitepaper2.pdf>

Capítulo 4

Modelos de simulación en diferentes clases de terminales

4.1 Introducción.

En los últimos años la atención que el mundo científico ha prestado a la industria marítima y portuaria ha tenido un crecimiento exponencial animada por la globalización de la economía y el incremento de los movimientos de mercancías por medio marítimo, y la necesidad de implantar técnicas de optimización y mejora de costes en un ambiente de alta competitividad entre productos, regiones y mercados.

Woo *et al.* (2012) recopilan un total de 840 artículos en el periodo 1980-2010 e indican cómo a lo largo de los años la cobertura sobre estos temas ha aumentado drásticamente. En la década de los 80 se habían seleccionado un total de 114 trabajos, este número casi se duplica una década después (213 referencias en la década de los 90) y quintuplica en la década de los 2000.

Esta atención ha sido aún mayor en el campo de la investigación operativa (OR) donde a los aspectos catalizadores indicados en el primer párrafo se añaden la mejora continua en las técnicas y métodos de simulación y optimización, y el desarrollo de recursos computacionales cada vez más potentes.

En efecto, analizando los estudios de Dragovic *et al.* (2016), sobre la modelización en entornos portuarios se observa como esta aceleración ha sido aún mayor, especialmente, a partir del año 2000. Así, entre 1961 y 1999 el número de artículos analizados por estos autores es de 33 (15%) mientras que a partir del 2000 el número se multiplica y alcanza 186 (85%) con una media inferior a un artículo por año pre-2000 y superior a 10 a partir de este año.

Pero de este último artículo se extrae otra importante conclusión: el mundo científico se ha visto mucho más atraído por la investigación exhaustiva en relación al tráfico y terminales de contenedores, quedando rezagadas desde el punto de vista de la literatura científica otras mercancías y tipo de infraestructuras portuarias, siquiera desde el punto de vista relativo. Esto resulta lógico dada la complejidad de las relaciones y número de actores y agentes en una terminal de contenedores.

Varios son los autores que a lo largo de los últimos años han dedicado esfuerzos a revisar los trabajos publicados en relación a modelos de simulación en ambiente portuario.

Entre los que se han publicado con posterioridad al año 2000 cabría destacar: Vis y de Koster (2003), Steenken *et al.* (2004), Murty *et al.* (2005), Günther y Kim (2006), Vacca *et al.* (2007 y 2010), Stahlbock y Voß (2008), Angeloudis y Bell (2011), Luo *et al.* (2011), Rashidi y Tsang (2013), Carlo *et al.* (2014a, 2014b y 2015), Gorman *et al.* (2014), Gharehgozli *et al.* (2014 y 2015) y, finalmente, Dragovic *et al.* (2016).

Si se repasa el contenido de estos estudios, todos menos el último se centran exclusivamente en el campo de las terminales de contenedores que abordan bien de una manera general o bien desde una aproximación especializada en relación a un problema concreto o a una parte del sistema.

Dentro del primer grupo (estudios de carácter general) podrían destacarse Steenken *et al.* (2004), Vacca *et al.* (2007 y 2010), Stahlbock y Voß (2008), Angeloudis y Bell (2011) y, por último, Rashidi y Tsang (2013).

Dentro del segundo grupo (estudios específicos) cabría señalar a Vis y de Koster (2003) que dedican su estudio al al transbordo de contenedores, Luo *et al.* (2011) quienes analizan con detalle las operaciones en el área de almacenamiento, Carlo *et al.* (2014a) quienes se centran en el área de almacenamiento y patio de contenedores, Carlo *et al.* (2014b) que se ocupan de las operaciones de transporte horizontal desde/hacia el parque hacia/desde el muelle y Gharehgozli *et al.* (2014 y 2015) quienes recopilan las operaciones internas de la terminal y su interacción con el hinterland.

La revisión ofrecida por Dragovic *et al.* (2016) es, sin embargo, más generalista y no se ciñe al ámbito del mundo del contenedor. Las conclusiones de estos autores y que ya se ha comentado, basado en la revisión de 219 artículos, es que mientras el 78% de los artículos versan sobre el funcionamiento de una terminal de contenedores, solo el 22% restante abordan las operaciones portuarias en otros contextos. Dentro de este grupo de “otros estudios” se incluirían las terminales de graneles (sólidos o líquidos) que han atraído el interés de 14 autores, lo que supone tan solo el 6.4% de la literatura publicada revisada por estos autores.

Desde esta perspectiva, no parece que un análisis de las publicaciones llevadas a cabo hasta la fecha en el contexto de terminales de contenedores aporte una novedad significativa en el mundo científico; contándose con un buen número de trabajos que abordan esta temática y algunos de fechas ciertamente recientes.

Sin embargo, no se conoce ninguna recopilación y análisis de técnicas OR aplicadas a otros ambientes portuarios. En tal sentido, se dedica este capítulo de la tesis doctoral a intentar solventar esa carencia.

Se analizarán varios ejemplos de terminales dedicadas. Primero se trataran las de graneles, tanto sólidos (apartado 4.2) como líquidos (apartado 4.3). Dentro de estas últimas, a su vez, se incluirán epígrafes específicos para: i) tráfico de crudo y productos petrolíferos (apartado 4.3.1), ii) gas natural licuado o GNL (apartado 4.3.2) y, iii) otros graneles líquidos (apartado 4.3.3).

También se dedicará un apartado a las terminales Ro-Ro, de vehículos y pasajeros (apartado 4.4) y terminales polivalentes, multipropósito o de mercancía general (apartado 4.5).

Se cerrará como es habitual con un resumen e indicación a futuros campos de investigación y (apartado 4.6).

4.2 Simulación en terminales de graneles sólidos.

4.2.1 Introducción.

El tráfico de graneles sólidos es hoy en día uno de los más relevantes en el concierto marítimo portuario. En el año 2015 se movieron un total de 4.695 millones de toneladas de estos productos por los puertos del todo el mundo lo que corresponde aproximadamente al 50% de las mercancías cargadas en los mismos (UNCTAD, 2015 e INTERCARGO, 2016).

Aun cuando las técnicas OR no se han introducido tanto en este tipo de terminales como lo han hecho en la de contenedores; terminales como las de mineral de hierro o las de carbón han sido sometidas en los últimos años a diversos ejercicios optimización mediante técnicas de simulación (fundamentalmente bajo paradigma DES).

Esta tendencia está experimentando un crecimiento exponencial.

En el presente apartado se hace un repaso de la literatura publicada en relación a la investigación operativa en estas terminales en el periodo 1965-2017 agrupando los estudios analizados (59 en total) en aquellos con características técnicas similares, y describiendo los estudios, técnicas y herramientas utilizadas.

Se presentan de igual modo conclusiones de cómo este campo científico ha evolucionado y se plantean posibles líneas de investigación futura.

El vacío de textos que se dedican específicamente al diseño bajo modelización de terminales de graneles sólidos ya fue puesto de manifiesto por van Vianen *et al.* (2015) quienes lo achacan al secreto profesional que guardan sobre el diseño de sus terminales los diferentes operadores o empresas de ingeniería que las asisten.

Sin embargo, no cabe duda que, tal y como pone de manifiesto Ottjes *et al.* (2007), el diseño de una terminal (su *lay-out* y configuración de su equipamiento), su operación, control y coste están íntimamente relacionados, siendo la modelización el mejor método para su investigación y optimización.

Así lo indican también Lodewijks *et al.* (2009) para quienes la futura demanda de graneles sólidos obligará bien al planteamiento de ampliaciones de capacidad o bien al rediseño y mejora de las existentes realizando en ellas un “*upgrading*” que les permitan operar en parámetros más eficientes y con mayores rendimientos, pero sin necesidad de ampliar la infraestructura portuaria.

En este proceso de rediseño, la modelización es sin duda un elemento clave y los ejercicios de emulación que se han indicado en apartados anteriores de esta tesis, una herramienta muy útil.

El objetivo de este subapartado es cubrir ese vacío aunque sea de una manera parcial, por lo que se propone una primera revisión de la bibliografía publicada en un contexto específico como es el de los graneles sólidos.

Efectivamente, no se conoce, un texto reciente que como los que se han visto con anterioridad y que versan sobre contenedores, trate de recopilar la literatura publicada en el contexto específico de estas de terminales. Así, el único texto recopilatorio que se ha encontrado es el trabajo de King *et al.* (1993) que analizaban los avances que había experimentado la modelización de terminales de graneles, pero ya hace 25 años.

Obviamente, en este periodo, muchos son los avances que se han presentado y muy conveniente proponer una nueva revisión y puesta en orden.

4.2.2 El mercado de graneles sólidos y su relevancia en el contexto marítimo portuario.

Conforme INTERCARGO (2016) en el año 2015 se cargaron un total de 4.681 millones de toneladas (MTons) de granel sólido en todo el globo, de las cuales el 66% (3.093 Mtons) corresponden a los que la industria suele denominar “*major bulks*” y que comprenden cinco grupos de mercancía encabezados por el mineral de hierro (1.353 Mtons), seguidas por el carbón (1.155 Mtons), grano (438 Mtons), bauxita/alúmina (119 Mtons) y fosfatos (28 Mtons) (tabla 20).

Tabla 20. Desglose de movimiento de graneles sólidos y total carga (MTons). Periodo 2006-2015.

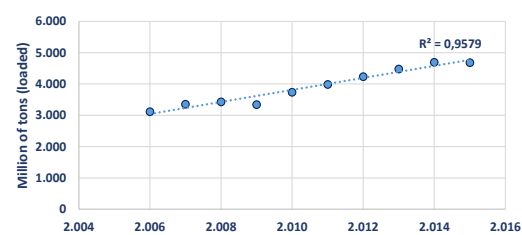
	2.006	2.007	2.008	2.009	2.010	2.011	2.012	2.013	2.014	2.015	CAGR (2006- 2015)
Iron Ore	713	777	841	898	991	1.053	1.110	1.189	1.337	1.353	7,4%
Coal	711	768	793	807	930	1.000	1.123	1.179	1.213	1.155	5,5%
Grain	292	306	319	321	343	345	375	390	432	438	4,6%
Bauxite/Alumina	78	93	97	74	96	113	107	139	105	119	4,8%
Phosphate Rock	30	31	31	20	23	29	30	28	30	28	-0,8%
5 Major Bulks	1.824	1.975	2.080	2.120	2.384	2.540	2.744	2.926	3.117	3.093	6,0%
Minor Bulks	1.289	1.375	1.351	1.219	1.353	1.447	1.488	1.553	1.578	1.589	2,4%
Total Bulks	3.113	3.351	3.431	3.339	3.737	3.987	4.232	4.479	4.695	4.681	4,6%
Total (all cargoes)	7.700	7.700	8.034	8.229	7.858	8.409	8.784	9.197	9.842	N/A	N/A
% Total Bulks / Total Cargoes	40%	44%	43%	41%	48%	47%	48%	49%	48%	N/A	N/A

Fuente: UNCTAD (2015) Total Carga e INTERCARGO (2016) datos de Granel Sólido.

En la última década, estas mercancías han experimentado un crecimiento sostenido y muy consistente con altos coeficientes de correlación si se aplican criterios de regresión lineal en la serie 2006-2015 (véase ilustración 134 a ilustración 139).

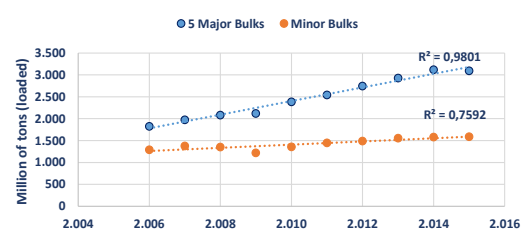
Así, la tasa de crecimiento interanual acumulada de los graneles sólidos en la última década ha sido del 4,6%, subiendo al 6,0% si el estudio se centra sólo en los cinco “*major bulks*” o a espectaculares ritmos del 7,4% en el caso del mineral del hierro o del 5,5% en el caso del carbón. Las razones de estas fuertes tasas de crecimiento a pesar de las situaciones de recesión económica que en determinados mercados se han vivido como consecuencia de la crisis financiera del año 2008, están fuera del alcance de este trabajo y habrá que buscarlas, entre otras, en la globalización de la economía o el fuerte incremento de la demanda que han introducido ciertas economías emergentes.

Ilustración 134. Toneladas cargadas de graneles sólidos. Periodo 2006-2015.



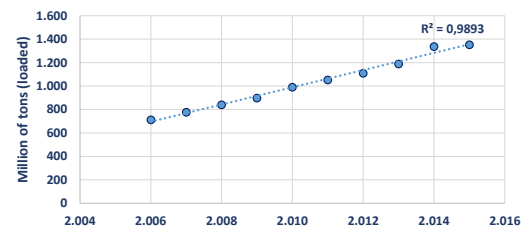
Fuente: Elaboración propia con datos INTERCARGO (2016).

Ilustración 135. Toneladas cargadas de graneles sólidos. División entre *major* y *minor bulks*. Periodo 2006-2015.



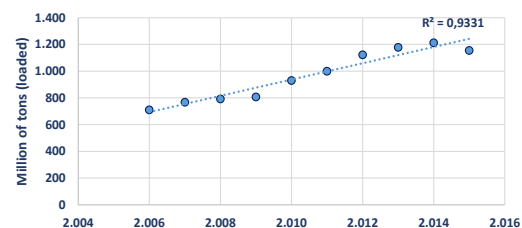
Fuente: Elaboración propia con datos INTERCARGO (2016).

Ilustración 136. Toneladas cargadas de mineral de hierro. Periodo 2006-2015.



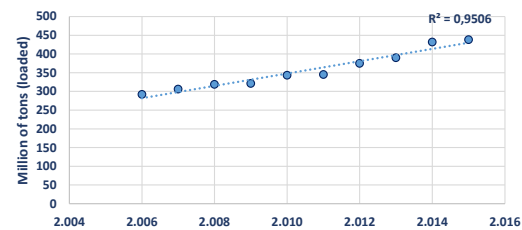
Fuente: Elaboración propia con datos INTERCARGO (2016).

Ilustración 137. Toneladas cargadas de carbón. Periodo 2006-2015.



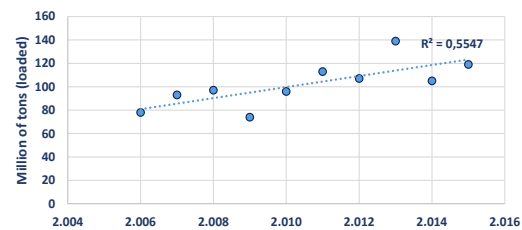
Fuente: Elaboración propia con datos INTERCARGO (2016).

Ilustración 138. Toneladas cargadas de grano. Periodo 2006-2015.



Fuente: Elaboración propia con datos INTERCARGO (2016).

Ilustración 139. Toneladas cargadas de bauxita / alúmina. Periodo 2006-2015.



Fuente: Elaboración propia con datos INTERCARGO (2016).

Esta tendencia de crecimiento es además acelerada si se consideran series más largas. Así acudiendo a los datos de UNCTAD (2015) si el grupo de los cinco “*major dry bulks*” movían 448 Mtons en 1970, esta cifra se había duplicado en 20 años (988 Mtons en 1990) pero multiplicado

por 7 en 45 año (3.112 Mtons en 2014) (tabla 21) con un perfil de crecimiento más cercano al exponencial positivo que al lineal (ilustración 140).

Pero no es sólo que los grandes graneles sólidos hayan crecido a ritmos muy sostenidos, sino que han ido ganando cuota de mercado con respecto al resto de mercancías y si en el año 1970 estas cinco mercancías representaban la ya nada despreciable cantidad del 17%, esta cuota había subido al 22% en el año 2000 y al 32% en el 2014 (ilustración 141).

Si se analizan no sólo los cinco grupos reseñados sino que se incluyen el resto de graneles sólidos, la cuota de mercado de este grupo está cercana al 50% ²⁶⁸.

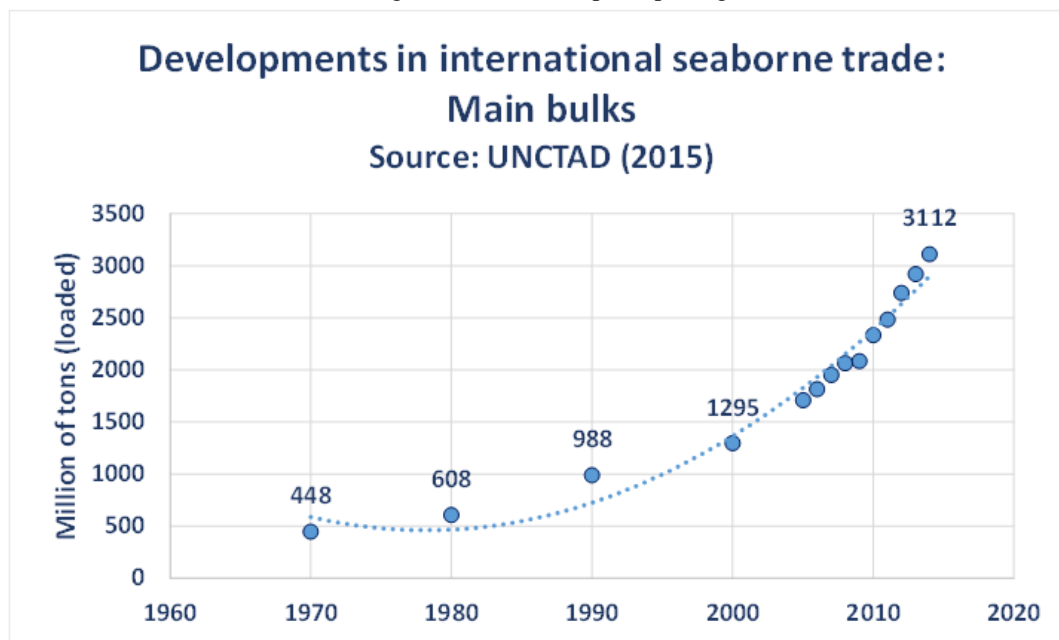
Tabla 21. Evolución del volumen de mercancía (Mtons cargadas) por diferentes grupos en años seleccionados del periodo 1970-2014.

Año	Oil & gas	Main bulks	Other dry cargo	Total (all cargoes)
1970	1440	448	717	2605
1980	1871	608	1225	3704
1990	1755	988	1265	4008
2000	2163	1295	2526	5984
2005	2422	1709	2978	7109
2006	2698	1814	3188	7700
2007	2747	1953	3334	8034
2008	2742	2065	3422	8229
2009	2642	2085	3131	7858
2010	2772	2335	3302	8409
2011	2794	2486	3505	8784
2012	2841	2742	3614	9197
2013	2829	2923	3762	9514
2014	2826	3112	3903	9842

Fuente: UNCTAD (2015).

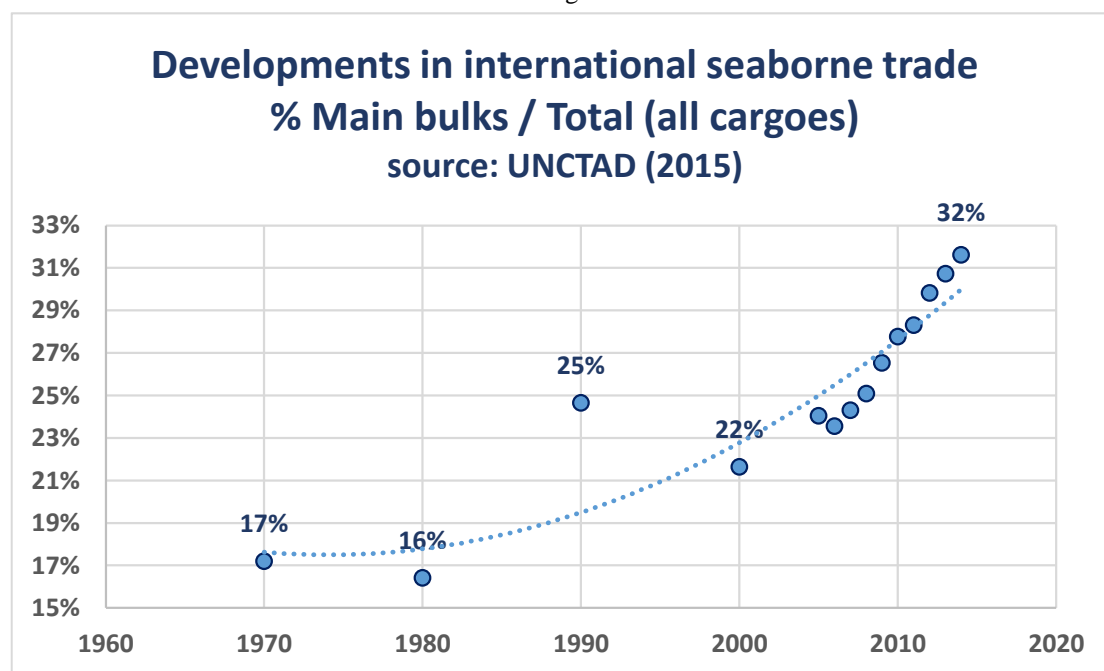
²⁶⁸ Véase lo datos de la Tabla 20.

Ilustración 140. Toneladas cargadas de los cinco principales graneles sólidos 1970-2014.



Fuente: Elaboración propia con datos UNCTAD (2015).

Ilustración 141. Porcentaje de toneladas de los cinco principales graneles sólidos respecto el total de carga.



Fuente: Elaboración propia con datos UNCTAD (2015).

Analizando el tamaño de la flota, de acuerdo con el informe “*Clarksons' Dry Bulk Trade Outlook 2015*”²⁶⁹ el número total de *bulk carriers* con un tamaño superior a 10000 toneladas de peso muerto (dwt en nomenclatura anglosajona) era al final de 2015 de 10.689 buques.

La capacidad acumulada de esta flota era de 778 millones de dwt y tenía una edad media de 8.8 años. Según estos analistas, se esperaba que el mercado siguiera creciendo ya que, acudiendo a datos del mismo informe, a cierre del año se encontraban en órdenes de construcción otros 1.532 barcos con una capacidad añadida de 124.9 millones de dwt.

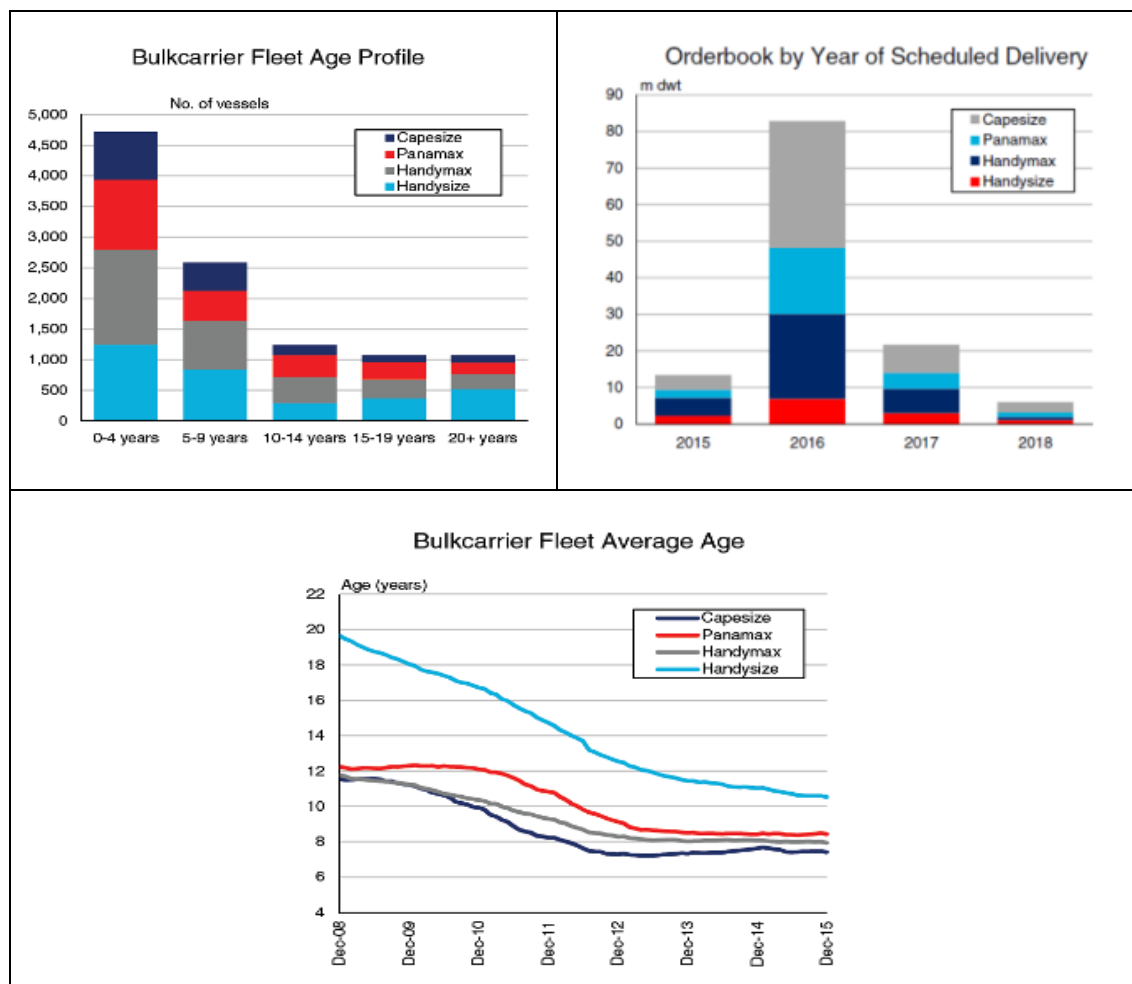
Tabla 22. Flota de *bulk carriers* por tipo de barco.

Tipo de buque	dwt	Hasta 01.01.2015		Hasta 31.12.2015	
		Número de buques	Millones de dwt	Número de buques	Million dwt
Handysize	10.000-39.000	1.638	308,2	1.633	309,5
Handymax	40.000-64.9000	2.428	192,4	2.467	196,4
Panamax	65.000-99.999	3.128	166,8	3.323	179,3
Capesize	>100.000	3.231	90,3	3.266	92,3
Total		10.425	757,6	10.869	777,5

Fuente: Clarksons' Dry Bulk Trade Outlook 2015

²⁶⁹ Se trata de un recurso web (no disponible en forma de publicación). Informe disponible en <https://www.clarksons.com/services/broking/dry-cargo/> [fecha de acceso el 25.05.2017]

Ilustración 142. Flota de bulk carriers. Edad media por tipo de barco y ordenes de construcción periodo 2015-2018.



Fuente: Clarksons' Dry Bulk Trade Outlook 2015.

Sin duda, en este contexto, la potencialidad que este sector presenta en el campo de la simulación y optimización no es baladí pero es que tampoco es moderna.

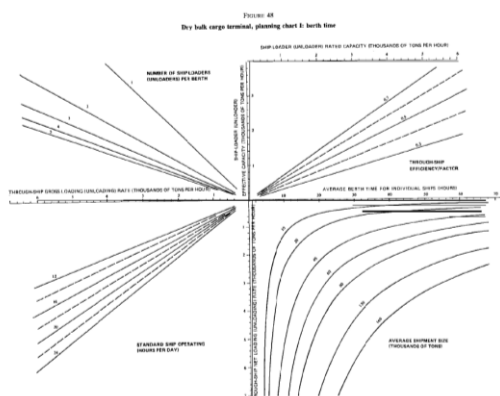
Así, ya en van Hemert (1984) se realiza un estudio sobre las terminales de importación de carbón que deberían construirse en países en vías de desarrollo para atender la demanda de generación eléctrica en un escenario de precios del petróleo crecientes.

El estudio se estructura en varias fases. Primero realiza un análisis de predicción de la cantidad de carbón que se comercializará internacionalmente por estos países (como justificación de los estudios a realizar), siguiéndole una descripción de la operación tipo de esta clase de terminales y finalizando con una propuesta del tamaño y coste asociado al desarrollo de dichas terminales.

4.2.3 Las operaciones en terminales de graneles sólidos. Descripción de equipamiento.

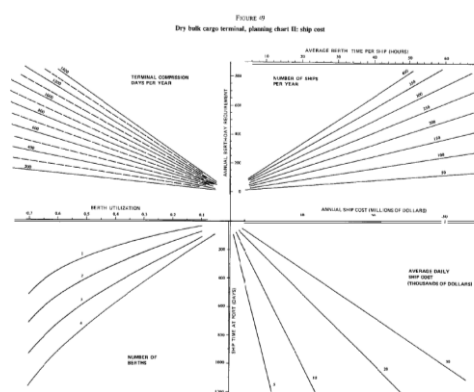
Uno de los primeros textos que trató de una manera muy comprensiva el diseño de terminales de graneles fue el manual de desarrollo portuario para países en desarrollo publicado en UNCTAD (1985), estudio que si bien no es específico de graneles sólidos ofrece un capítulo entero a este tipo de terminales, describiendo su tipología y tipo de maquinaria asociada, así como unos procedimientos analíticos sencillos (en forma de gráficos y ábacos de cálculo) para su dimensionamiento (véase ilustración 143 a ilustración 146).

Ilustración 143. Abaco de dimensionamiento de una terminal de graneles sólidos 1: Dimensionamiento de atraque y descargadores.



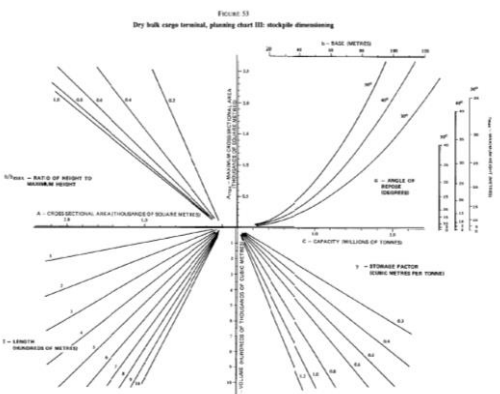
Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 144. Abaco de dimensionamiento de una terminal de graneles sólidos 2: Coste de barcos.



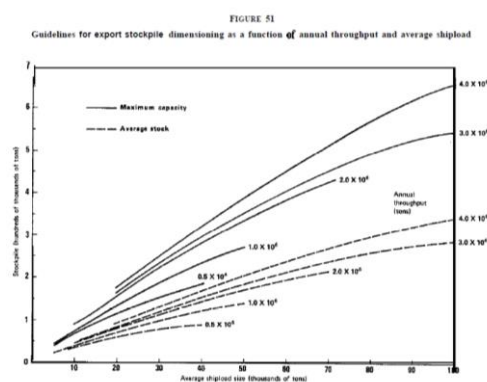
Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 145. Abaco de dimensionamiento de una terminal de graneles sólidos 3: Zona de Almacenamiento



Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 146. Gráfico de dimensionamiento de la zona de almacenamiento en función de la capacidad anual requerida y tamaño medio de cargamento.



Fuente: UNCTAD (1985).

Una típica terminal de exportación de granel sólido está compuesta por un sistema de conexión de la terminal con su hinterland que bien puede estar alimentada por cintas (*overland conveyer*) u

otro modo de transporte (trenes, camiones o incluso otros barcos o barcasas si es el caso de una terminal donde se produce el transbordo).

Así el material llega desde la mina, centro de expedición u otra instalación intermedia de transferencia o consolidación. Desde aquí, usualmente, un sistema de cintas reparte el material en diferentes camas o pilas de almacenamiento donde el material es depositado por una apiladora (*stacker*).

Una vez que el material es solicitado para ser cargado en barco una cargadora en la zona de pila (*reclaimer*) deposita el material en una cinta que lo lleva hasta la zona de muelle (*jetty conveyor*) donde es cargado en el buque mediante una cargadora (*shiploader*).

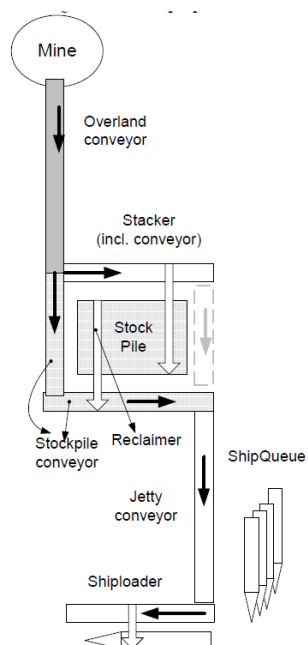
Habitualmente las funciones de apilado y retirada del material se hacen por el mismo elemento que entonces pasa a denominarse *stacker-reclaimer* o “SC”.

Obviamente esta configuración tipo puede encontrar variantes como, por citar una de las más frecuentes, confiar los movimientos internos del material a vehículos de transporte horizontal (camiones alimentados desde palas por ejemplo).

El funcionamiento de una terminal de importación es similar pero en vez de ser alimentada la terminal desde tierra, lo es desde mar (mediante *bulk-carriers* y barcasas).

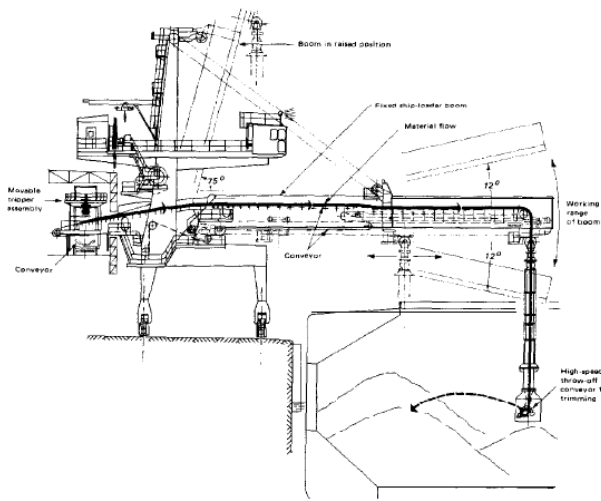
Ejemplo de la maquinaria citada y su configuración básica se presentan desde la ilustración 147 a la Ilustración 153.

Ilustración 147. Configuración típica de una terminal de exportación de granel sólido.



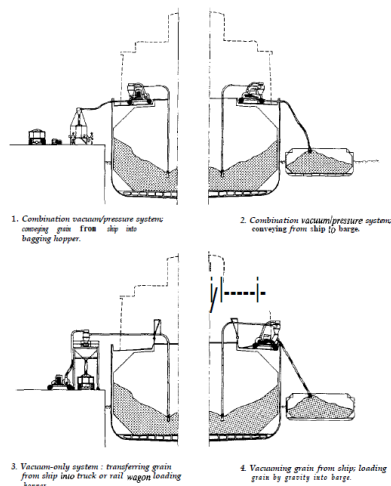
Fuente: Otjjes y Lodewijks (2004).

Ilustración 148. Ejemplo de cargador móvil (travelling ship-loader) alimentado desde cinta.



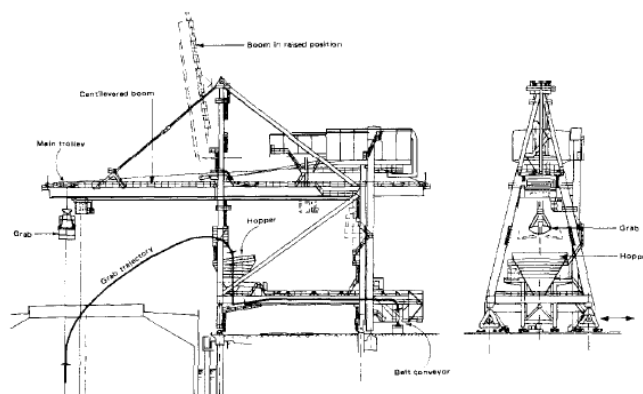
Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 149. Equipo de carga neumático.



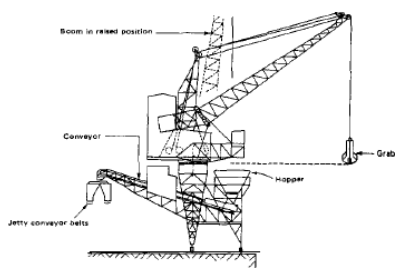
Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 150. Ejemplo de descargador móvil de cuchara (travelling overhead trolley unloader grabbing crane).



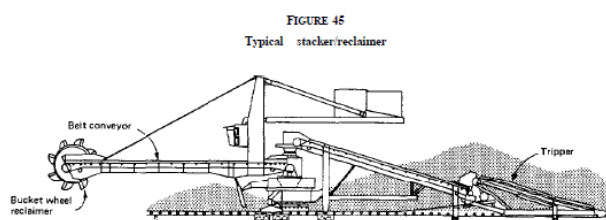
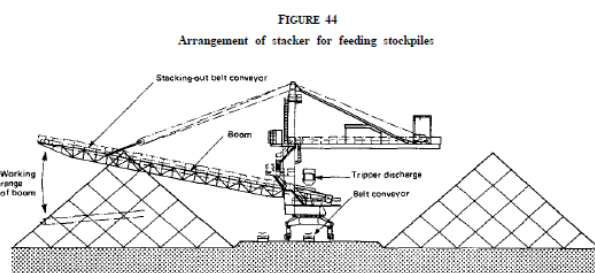
Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 151. Grúa de cuchara convencional.



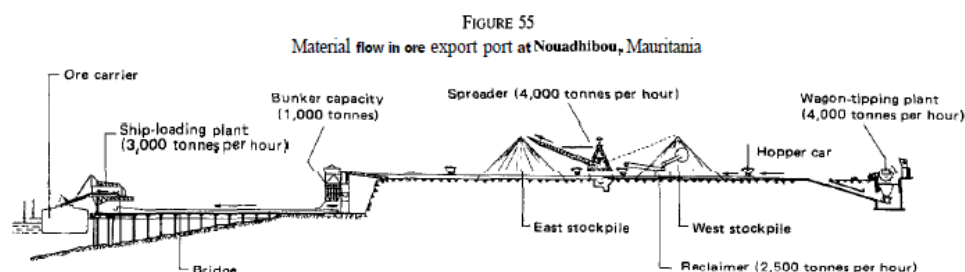
Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 152. Stacker / reclaimers.



Fuente: UNCTAD (1985).

Ilustración 153. Ejemplo de terminal de exportación de mineral de hierro en Nouadhibou (Mauritania).



Fuente: UNCTAD (1985).

Dependiendo del tamaño y tipo de material, la configuración anterior (con depósito al aire libre) puede verse modificada con necesidades de almacenamiento en depósitos cerrados o silos (típico caso del grano) y los sistemas de transporte interno del material (cintas o camiones) incluso remplazados por tuberías y sistemas neumáticos que permitan su bombeo (cemento por ejemplo) (ilustración 149).

Sea como fuere el funcionamiento de una terminal de granel se puede modelizar de una manera más o menos sencilla dividiéndola en elementos simples: zona de entrada / salida (*gate*), almacenamiento (*stock yard* o silos) y operación marítima – atraque (*sea side* o *berth*) y especificando los rendimientos y distribución (determinista o estocástica) tanto de su maquinaria como de las colas que alimentan el sistema (distribución de llegada de buques, de llegada de trenes, etc...).

Como ya pusieron de manifiesto Otjjes y Lodewijks (2004) la fiabilidad de una terminal de graneles viene determinada por tanto por una combinación de la fiabilidad de los elementos individuales que la componen y el mejor método para su análisis de detalle es sin duda mediante técnicas de simulación.

Ilustración 154. Ejemplos de stacker-reclaimer (fotografías superiores), cargadores/descargadores de muelle (fotografías intermedias) y sistemas de cintas (fotografía inferior) en terminales de graneles sólidos.



4.2.4 Revisión bibliográfica de trabajos de simulación y modelización en terminales de graneles sólidos.

4.2.4.1 Descripción cronológica de los estudios publicados sobre graneles sólidos.

Los pioneros en tratar las terminales de graneles sólidos desde las herramientas de OR fueron Steer y Page (1961) quienes construyeron un modelo de simulación para investigar las capacidades operativas y posibilidades de expansión de una terminal de importación de mineral de hierro.

Según los propios autores trataban de superar las limitaciones físicas intrínsecas de la terminal, primero analizando la capacidad de las infraestructuras y medios existentes para, después, estimar posibles mejoras en el rendimiento con medidas adicionales y en comparación con escenarios alternativos.

Para ello construyen un modelo de generación de tráfico de llegada (con llegadas aleatorias) y con el modelo son capaces de simular la totalidad del proceso de la terminal.

Beattie *et al.* (1970 y 1971) también abordarían una década después la gestión global de una terminal de mineral de hierro de la *British Steel Corporation* a través de un proceso de modelización numérica.

Este recorrido histórico avanza hasta Baunach *et al.* (1985) quienes hacen un estudio sobre una terminal de transbordo de carbón en *Batam Island* (Indonesia). Estos autores defienden la implantación de las técnicas de simulación como un elemento muy útil en las fases previas de diseño y para ello modelizan con técnicas DES la terminal arriba referida y comparan diferentes alternativas de atraque y configuración de equipamiento con la que dotar a la misma. El objetivo es determinar la capacidad total de la terminal, encontrar cuál es el óptimo y demostrar que la misma opera de una manera eficiente bajo la configuración escogida.

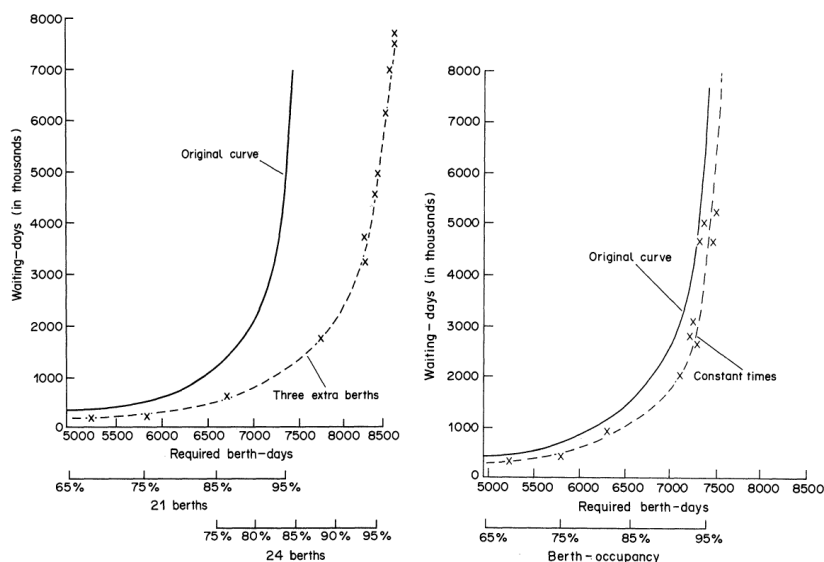
El Sheikh *et al.* (1987) analizan el número de atraques que requería una terminal de graneles utilizando técnicas de simulación. Estos autores construyen un modelo que aplican a un ejercicio de análisis de expansión en un puerto de un país en desarrollo (sin explicitar de qué ejemplo se trata) y cuyos resultados comparan con datos reales observados en cuanto a tasas de ocupación y tiempos reales de espera y servicio de buques.

Para ello estudian los estadísticos reales en relación a 28 diferentes categorías o tipos de tráfico (proporcionando para cada uno de ellos los datos medios de tiempo entre llegadas de buques y duración del servicio de los mismos, basados en un periodo de observación de un año y anotando que en sus distribuciones todos los tráfico ajustan a estadísticos *Earlang*, aunque sin indicar, la

fase o parámetro “K” del mismo)²⁷⁰ y construyen unas subrutinas de asignación de atraques con prioridades en las que para cada uno de los diferentes tráficos se asignan atraques preferentes y para cada uno de los puestos de atraque (24 en total) se determinan criterios de prioridad para estos tráficos.

En su análisis utilizan como *input* de entrada unas proyecciones de tráfico futuro por tipo de tráfico proporcionada por la Autoridad Portuaria y toman como base de la estimación el indicador de espera relativa y como criterio de aceptabilidad las referencias de UNCTAD (1985) (los autores citan esperas relativas entre el 0.1 y el 0.2, fijando como objetivo 0.1)²⁷¹.

Ilustración 155. Resultados del ejercicio simulación y evaluación del número de atraques necesarios en la ampliación portuaria.



Fuente: El Sheikh *et al.* (1987).

Desde el punto de vista técnico, el modelo explotado por las autores era un modelo *ad hoc* escrito en UCSD Pascal en un microcomputador Sirius -1 utilizando técnicas ACD (“*activity diagram cycle*”)²⁷² en el que un ciclo lo forman los barcos llegando al puerto, esperando si no existe atraque libre, realizando el servicio una vez que disponen de él y saliendo una vez terminado; y el segundo ciclo lo conforman los propios muelles que se encuentran en servicio si tienen un buque atracado o permanecen ociosos y en espera de recibir un nuevo buque si no existe barco asignado en ellos.

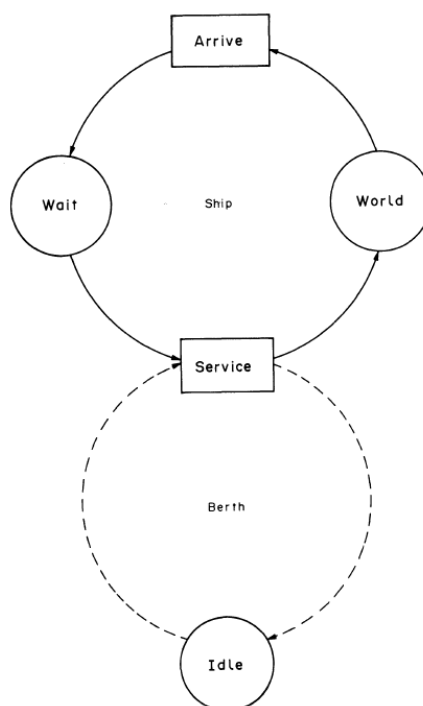
²⁷⁰ Los conceptos de tiempo de servicio y tiempos entre llegadas de buques, así como sus distribuciones típicas, son explicadas con detalle en el anejo 1 de la presente tesis en la que se abordan los clásicos métodos analíticos, entre los que destaca los basados en teoría de colas.

²⁷¹ El concepto de espera relativa y su rango de valores admisibles es abordado en el anejo 1 de la presente tesis doctoral.

²⁷² ACD es la forma natural de representar actividades programadas bajo paradigma DES que están especialmente prescritos en sistemas con una marcada estructura de colas y que vienen descritos de una manera muy didáctica en Minitorn (1997).

El punto de conexión entre los dos ciclos es precisamente el servicio de la manera que se representa en la siguiente gráfica extraído del propio artículo de estos autores (ilustración 156).

Ilustración 156. ACD (“Activity cycle dyagram”) para un modelo portuario.



Fuente: El Sheikh et al. (1987).

En paralelo trabajan Park y Noh (1987a y 1987b). Estos autores desarrollan una simulación mediante técnica de Montecarlo para estudiar la expansión de una terminal de graneles sólidos en el puerto de Mobile (Alabama, Estados Unidos) con el objetivo de simular la capacidad del puerto y contraponerla con la demanda futura de instalaciones.

En una primera parte de su investigación analizarán los efectos que tiene la expansión portuaria planteada para en una segunda evaluar los resultados económicos asociados a dicha expansión. Para ello toman como caso de estudio la terminal de carbón conocida como McDuffie Terminal²⁷³ en el puerto arriba mencionado. En la simulación estos autores utilizan el lenguaje SLAM.

²⁷³ Actualmente esta terminal es la segunda terminal más grande de carbón de EEUU (la primera de importación) y en el año 2015 se movieron por estas instalaciones cerca de 14 millones de toneladas. Cuenta con tres atraques, 1 cargador y 3 grúas de descarga de muelle con una capacidad nominal estimada de 30 millones de toneladas. Más información sobre la terminal puede encontrarse en http://www.asdd.com/facilities_mcduffie.html [fecha de acceso 15.11.2016]

Poco después Guimaraes y Kingsman (1989) expanden las investigaciones al caso concreto de una terminal de grano en el puerto de Lixoes (Portugal) construyendo un modelo donde las constricciones son un elemento relevante y se centran en resolver el problema ante la aparición de lo que ellos denominan “sucesos raros” que imponen condicionalidades relevantes. Estos autores proporcionan, no obstante, pocos datos sobre la arquitectura del modelo que construyen directamente en FORTRAN pero del que no dan detalles de su estructura mediante flujogramas o gráficos de simulación o animación.

Wadhwa (1992) centra sus investigaciones en una terminal de carga de graneles sólidos en Australia y se fijan como objetivo el utilizar la simulación para chequear diferentes políticas para conseguir una mejora de los rendimientos y un incremento de la capacidad de la terminal.

Su modelo, muy fundamentado en los procedimientos analíticos de teoría de colas, trata de lograr la máxima capacidad posible analizando el tiempo de ocupación / disponibilidad de atraques, las longitudes de las colas de buques en espera y su tiempo medio de espera, los tiempos de operación y demoras (con sus costes).

Como elemento novedoso consideran el estado operativo que en cada momento imponen las mareas (fundamentalmente en el acceso a través del canal) y proponen medidas de incremento de la eficiencia mediante mecanismos del tipo premio/castigo. Para su desarrollo estos autores utilizan el lenguaje de programación PASCAL.

Sánchez y Sampedro (1993) y posteriormente Sánchez *et al.* (2005) construyen un modelo para analizar la llegada de *bulk carriers* a una terminal de importación de carbón desde diversos orígenes (Australia, China y Rusia).

Se trata de una terminal de grandes dimensiones (9.5 millones Ton/año) situada en el puerto de Lázaro Cárdenas (México) que abastece a una central térmica de 2.800 MW. El modelo se utiliza para evaluar estrategias de inversión en infraestructura portuaria (número óptimo y tamaño de atraques) teniendo en consideración las necesidades de suministro y de almacenamiento de producto en un horizonte de largo plazo (50 años) coincidente con la vida útil de la central.

King *et al.* (1993) realizan estudios de planificación y resolución de cuellos de botella en una terminal de graneles que aplican de manera práctica a una instalación portuaria que alimenta una central térmica en China. Los trabajos comienzan con una introducción sobre los últimos avances que hasta la fecha se habían dado en el diseño mediante técnicas de simulación de este tipo de terminales, única de su género que se ha encontrado hasta la fecha.

Kao *et al.* (1993), Hsu y Chen (1997), Shih (1997) y Liu y Sherali (2000) centran sus investigaciones en la modelización de la cadena de suministro de carbones de distintos orígenes hasta el cliente final en Taiwan (la utility *Taiwan Power Company* o “TPC”).

El modelo de estos autores es global centrándose no sólo en la logística y transporte de este material (y su componente portuaria en las terminales de importación) sino en los propios procesos de compra de material a diferentes suministradores considerando su coste y calidad para, teniendo en cuenta la teoría de inventarios, representar un proceso de aprovisionamiento óptimo con mezcla de carbones en la más adecuada proporción.

El modelo considera, por tanto, no sólo las instalaciones portuarias de entrada de material sino los puntos de origen (suministradores) y los puntos de consumo final (centrales de generación finales) junto con las instalaciones de mezcla de diferentes carbones y las constricciones medioambientales que introducen cada uno de los materiales / orígenes que se manejan en el modelo. Desde el punto de vista técnico los autores utilizan un sistema de programación lineal en enteros ("MIP" o *mixed-integer zero-one programmin*) con algoritmo tipo *branch-and-bound*.

Como se verá con posterioridad, las técnicas MIP, son ampliamente utilizadas tanto en estos contextos de graneles sólidos, como después en graneles líquidos.

Sin necesidad de citar todos los anteriores, pero por poner un ejemplo, Shih (1997) plantea como objetivo de su modelo ayudar a TPC a minimizar el coste total del inventario a través de minimizar el coste de la cadena logística (incluyendo la compra del carbón, su transporte y su almacenamiento).

Como constricciones del modelo, incluye las políticas de compra de la compañía, la demanda de generación eléctrica, la capacidad de descarga del puerto, las ecuaciones de balance de inventario, los requerimientos de mezclado y el mantenimiento de unos *stocks* de seguridad mínimos.

Bhasi y Acharcya (1997), continuando con Jagathy *et al.* (2001), Bhasi (2004) y Jagathy y Acharya (2007), analizan durante más de una década mediante técnicas de simulación en un modelo DES la flota óptima de barcas (número y mix del tipo de ellas) que dan servicio a una fábrica de acero considerando para ello: 1) operación de transbordo entre buques²⁷⁴; 2) posterior transporte del material trasbordado en barcas más pequeñas aguas arriba hasta la terminal portuaria; y, 3) retorno final de producto terminado desde esta terminal al punto original de transbordo.

Bhasi y Acharcya (1997) acoplan el modelo dentro de un contexto más global enmarcado en un estudio económico de las repercusiones que tendrían en el descenso de costes de operación unas obras de dragado en dicho río y la repercusión unitaria en términos de coste (coste/tonelada) que

²⁷⁴ Llamada "*lightering operation*" en literatura anglosajona y referenciada así por ser muy usual la utilización de esta definición incluso en textos científicos en castellano.

tendría elegir una u otra localización de la terminal en un completo y elegante ejercicio de planificación portuaria.

Con el modelo ya construido estos autores pasarían a investigar cuál era la flota necesaria para realizar las operaciones en condiciones óptimas (Jagathy *et al.* 2001 y Bhasi, 2004).

Finalmente, Jagathy y Acharya (2007) hacen evolucionar el modelo inicial hacia un auténtico DSS implantado con éxito en la factoría para tomar las decisiones operacionales dentro de su cadena logística de aprovisionamiento. De este modo, lo que empezó siendo un modelo con fines estratégicos (decidir cuál es la mejor inversión) acabó siendo un modelo con fines tácticos (composición de flota) y, finalmente, operacionales (implementación de decisiones en el día a día).

Jin *et al.* (1999) abordan el diseño óptimo de un sistema logístico-portuario asociado a una terminal de granel utilizando técnicas de simulación DES y aplicando técnicas de resolución tipo *Fuzzy* con el objetivo de optimizar el funcionamiento de la terminal.

Estos autores describen como persiguen un objetivo múltiple en lo que se refiere a la optimización de los resultados económicos de la terminal y la maximización de disponibilidad de instalaciones.

Tres son los parámetros que aplican: i) valor presente neto del sistema; ii) tiempo medio de estancia de los buques en puerto; y, iii) ratio de utilización de las explanadas.

La técnica *Fuzzy* se utiliza para tratar con la incertidumbre inherente al proceso de decisión humano y determinar de manera objetiva la solución óptima razonable aplicando técnicas de discriminación Pareto.

Validan el modelo con datos reales (no se dispone información sobre cuál es el escenario experimental) y hacen un análisis de sensibilidad a ciertos parámetros medioambientales.

Weiss *et al.* (1999) abordan una vez más una simulación y optimización de unas instalaciones portuarias de recepción, almacenamiento, mezclado (blending) y carga de graneles sólidos (carbón).

Estos autores analizan diferentes estrategias de posicionamiento de cada uno de los productos a lo largo de las pilas de almacenamiento y cómo estas diferentes estrategias producen efectos en los factores de utilización de las cintas, en la maquinaria de la zona de almacenamiento (*stackers/reclaimers*) y, a resultas de todo ello, en la eficiencia global de la terminal.

Wadhwa (2000) presenta un problema clásico en planificación portuaria como es el analizar cuál es el número de descargadores que resultan en el óptimo económico considerando por un lado el minimizar los costes de espera del buque (algo que se logra con mayor número de equipos portuarios) y minimizar los costes portuarios (lo que se logra minimizando la infraestructura

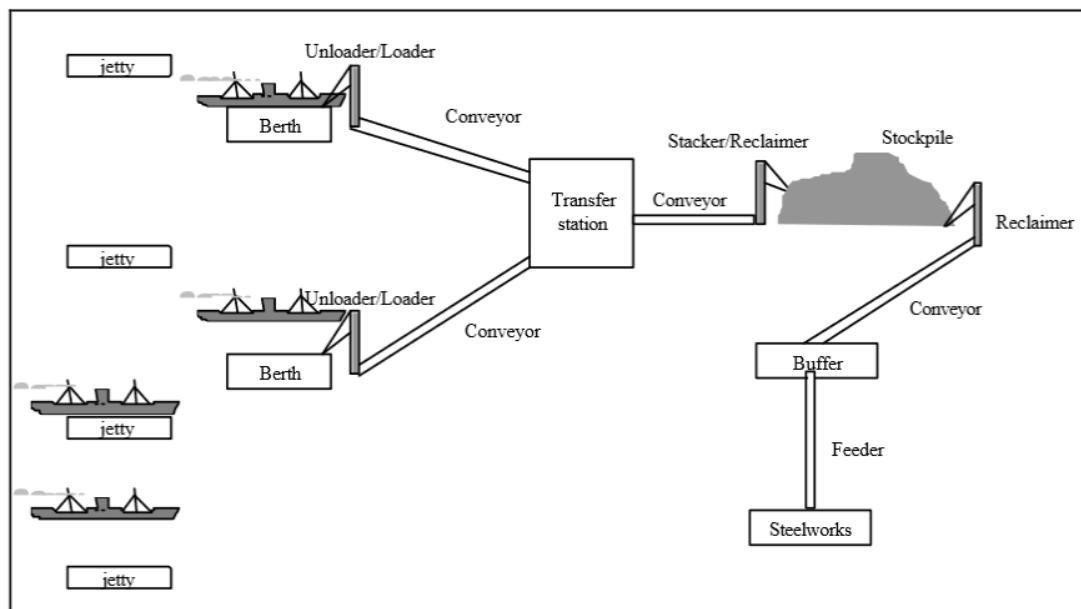
portuaria y su equipamiento). El modelo, que se implementa de manera práctica sobre el software comercial ARENA®, se aplica sobre una terminal de graneles de Australia.

Dahal *et al.* (2003 y 2007) construyen un modelo basado también en algoritmos genéticos y mediante la simulación de dos casos de estudio (terminal de carbón y terminal de mineral de hierro) demuestran que la adopción de estas técnicas supone una mejora operacional significativa en una terminal de graneles sólidos (que se traducen en una mejora del rendimiento económico de las terminales analizadas).

Describen una terminal tipo de importación y exportación en la que el movimiento horizontal se produce desde/hacia el barco por cintas transportadoras (“conveyor” en la ilustración 157) que confluyen en una estación de transferencia (“transfer station”) desde donde parte otro sistema de cintas hasta la zona de almacenamiento (“stockpile”).

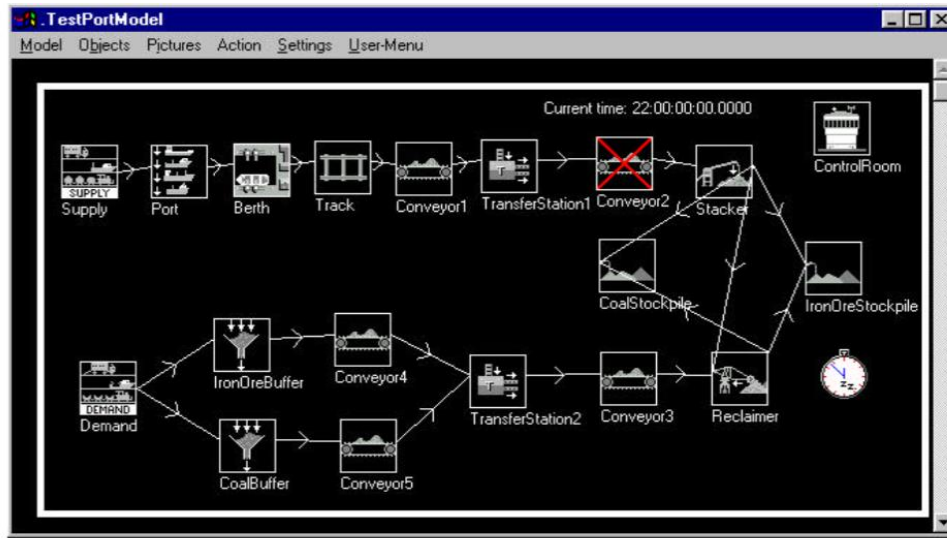
Desde el punto de vista técnico utilizan un paradigma DES con la ayuda del software PORTMODEL.

Ilustración 157. Esquema operativo de una terminal de graneles sólidos.



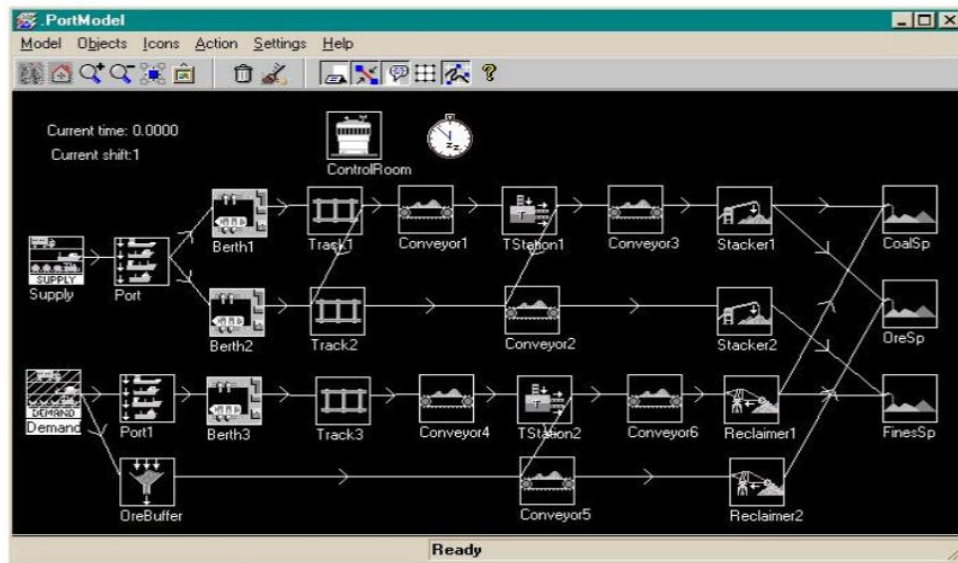
Fuente: Dahal *et al.* (2003).

Ilustración 158. Representación del modelo de una terminal de carbón programada en PORTMODEL.



Fuente: Dahal et al. (2003).

Ilustración 159. Representación del modelo de una terminal de mineral de hierro programada en PORTMODEL.



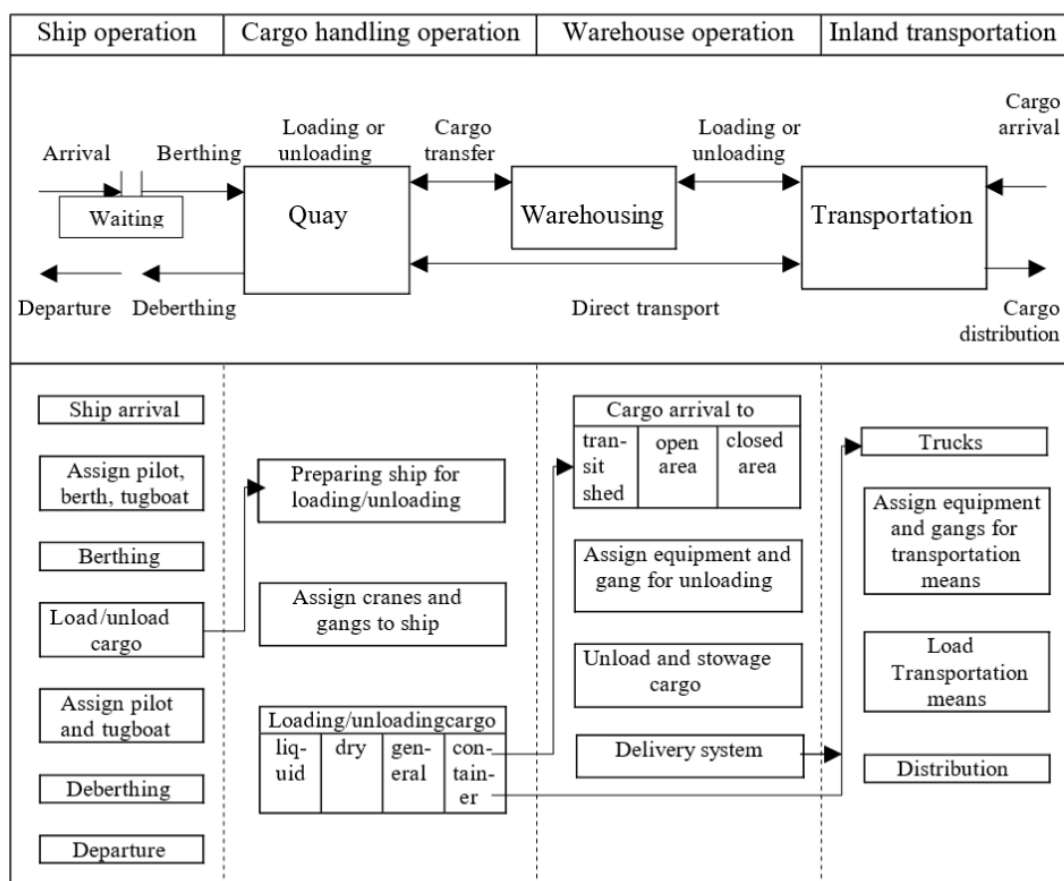
Fuente: Dahal et al. (2003).

Demirci (2003) realiza un estudio de simulación para analizar las mejores estrategias de inversión en el puerto de Trabzon (Turquía) centrándose específicamente en los equipos de manipulación en tierra y en una base experimental multipropósito (modelo portuario global con varios muelles y todo tipo de carga incluyendo granel, ro-ro y mercancía general).

En su modelo se generan cinco tipos de elementos: barcos (*ships*), mercancía (*cargoes*), grúas de manipulación y vehículos de transporte (*loading/unloading & transportation vehicles*), muelles

(*quays*) y almacenes (*warehouses*) que responden a una lógica secuencial de operativa portuaria que se representa en la ilustración 160.

Ilustración 160. Secuencia de operación portuaria en una terminal.



Fuente: Demirci (2003).

Para calibrar el modelo utilizaron datos reales de llegadas de buques en 1997 (297 escalas) estimando, para cada tipo de buques²⁷⁵ y elemento de manipulación, las distribuciones de tiempo de llegada de buques y de tiempo de servicio de los mismos (tras realizar los test estadísticos adoptan definitivamente distribuciones estadísticas exponenciales o markovianas).

²⁷⁵ Dividen en tres clases de buques en función de que sus esloras sean menores de 60 metros, mayores de 120 metros o entre ambas magnitudes.

En su modelo consideran diferentes políticas de asignación de atraque (FIFO²⁷⁶, LIFO²⁷⁷, LSF²⁷⁸ y HSF²⁷⁹) a las que incorporan ciertas reglas de prioridad. En concreto, aplican una regla de “urgencia” por lo cual aquellos buques que transportan productos perecederos o animales vivos tienen prioridad absoluta para el atraque²⁸⁰.

Su modelo, centrado en identificar los cuellos de botella en la operación, lo corren en unas condiciones de congestión o de máxima ocupación de tal manera que para cada estado de ampliación o capacidad generan unas llegadas de buques congruentes con tal capacidad, estimando donde se producen las ineficiencias²⁸¹.

Su modelo se construye con ayuda del software comercial Awesim©.

Otjjes y Lodewijks (2004) estudiaron mediante modelización una terminal de exportación de granel sólido alimentada desde una mina mediante un sistema de cintas. Para ello descomponen el sistema en sus elementos individuales a los que asignan diferentes rendimientos y distribución del tiempo de trabajo. Así, consideran las distribuciones estadísticas que se citan a continuación e introducen como variable estocástica del proceso los retrasos en la llegada de los *bulk carriers*:

- Distribuciones exponenciales para el tiempo de trabajo de las cintas que alimentan la terminal desde la mina, el sistema de cintas que llega a la zona de apilado y las cintas que alimentan el cargador desde la zona de apilado²⁸²,
- Distribución uniforme para la grúa cargadora de barcos²⁸³,
- Distribución normal para el apilador²⁸⁴, y
- Distribución determinista o fija para el elemento que carga las cintas en dirección a muelle desde zona de almacenamiento (*reclaimer*)²⁸⁵.

²⁷⁶ *First in - first out*. Es decir atender primero al primer barco que llegó a Puerto.

²⁷⁷ *Last in - first out*. Es decir atender primero al último barco en llegar.

²⁷⁸ *Low size first*. Es decir atender primero al barco de menores dimensiones.

²⁷⁹ *High size first*: Es decir atender primero al barco de mayores dimensiones.

²⁸⁰ Otros autores que tratarán en sus investigaciones de comparar diferentes políticas de asignación de atraques (fuera estos del ámbito de graneles sólidos) son Asperen *et al.* (2003), Røsæg (2009) y Álvarez *et al.* (2010).

²⁸¹ Estiman no obstante que la capacidad de almacenamiento es “infinita” y que no existe restricciones de capacidad por otros factores como humanos (estiba), meteorológicos u horarios (puerto operativo 365 días x 24 horas).

²⁸² Con rendimientos medios de 1.200 Tn/h en los dos primeros casos, y de 3.600 Tn/h en el último.

²⁸³ Con rendimiento de 3.600 Tn/h.

²⁸⁴ Con media de 1200 Tn/h.

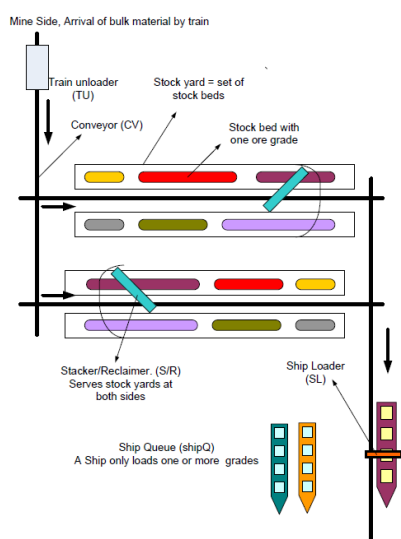
²⁸⁵ Con rendimiento fijo de 2.400 Tn/h.

Con diferentes configuraciones son capaces de modelizar la capacidad de la terminal y examinar determinados parámetros de rendimiento (como por ejemplo los tiempos de espera de buques).

Siguiendo con estos trabajos, Ottjes *et al.* (2007) desarrollan un modelo similar al anterior y con los mismos objetivos pero con la variante que esta vez el sistema de alimentación de la terminal desde la mina es el tren en vez de las cintas transportadoras.

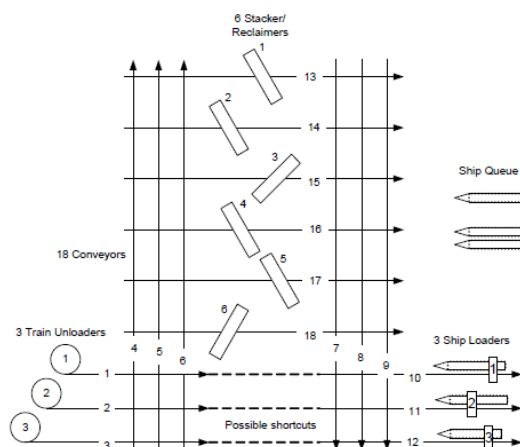
Ambos modelos (Ottjes y Lodewijks, 2004 y Ottjes *et al.* 2007) lo desarrollan sobre el paquete de simulación “Tomas” desarrollado sobre el lenguaje de programación Delphi y presentado en Weeke y Ottjes (2000)(ilustración 161 e ilustración 162).

Ilustración 161. Configuración tipo de una terminal de exportación de granel sólido alimentada por ferrocarril y operada mediante cintas, stacker-reclaimer y grúas de carga a buque.



Fuente: Ottjes *et al.* (2007).

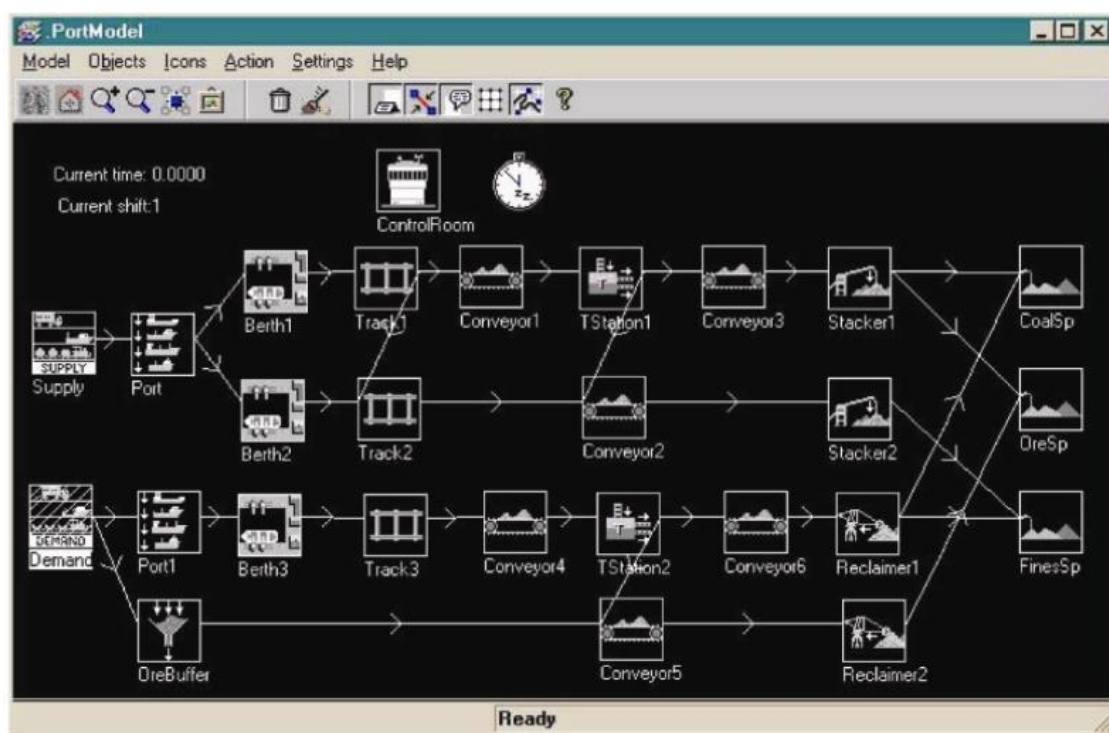
Ilustración 162. Modelización de una terminal de exportación de granel sólido alimentada por tres descargadores de ferrocarril (“train unloaders”), diseñada con 18 convoys de cintas transportadoras (“conveyors”) y 6 stacker-reclaimer operando en la zona de almacenamiento (“stock yard”), que alimentan 3 grúas de carga de bulkcarriers.



Fuente: Ottjes *et al.* (2007).

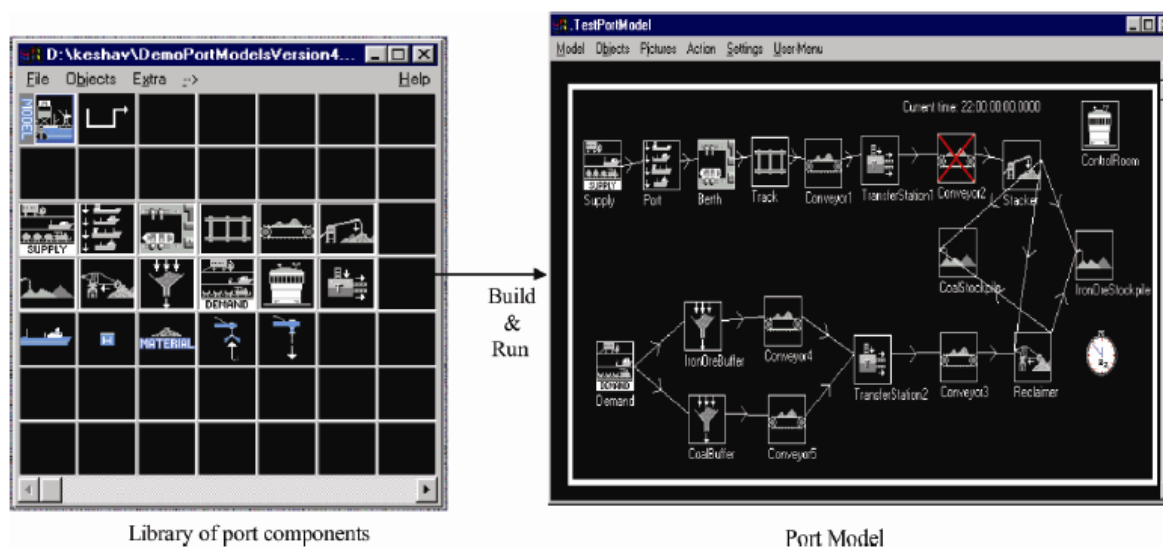
Los estudios de Dahal *et al.* (2007) siguen la senda de su antecesor Dahal *et al.* (2003) usando el mismo tipo de terminal (graneles sólidos), algoritmo (genético), herramienta (PORTMODEL) y arquitectura del estudio (dos casos de estudio), llegando a conclusiones similares pero en este caso complicando el modelo con la adopción de una terminal con mayor número de atraques (tres en estos estudios frente a un único atraque de los estudios de 2003)(ilustración 163 a ilustración 165).

Ilustración 163. Representación del modelo de una terminal graneles sólidos de tres atraques programada en PORTMODEL.



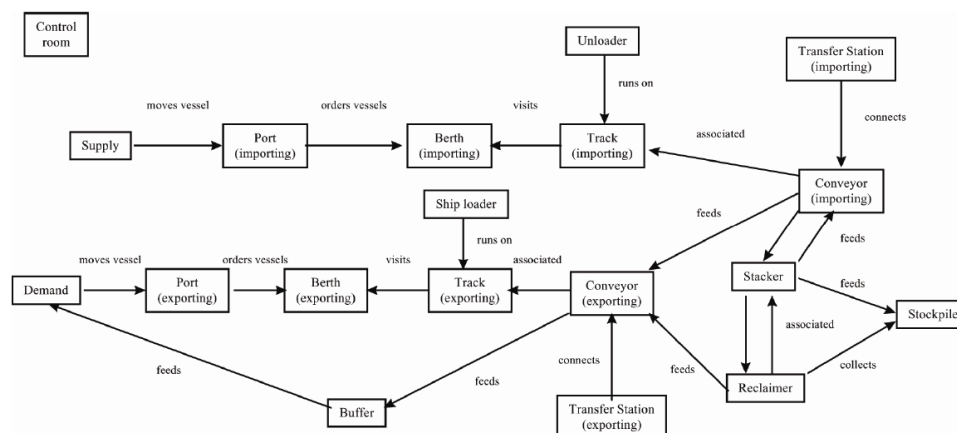
Fuente: Dahal *et al.* (2007).

Ilustración 164. Ejemplo de librería para puertos de Portmodel y modelo generado.



Fuente: Dahal *et al.* (2007).

Ilustración 165. Esquema general de una terminal de graneles y relación entre las distintas componentes.

Fuente: Dahal *et al.* (2007).

Estos estudios de K. Dahal y sus colegas encuentran claros antecedentes como los desarrollados por Shah (1996) quien analiza las técnicas de programación para el suministro de crudo de petróleo a una refinería y por tanto no se abordan aquí siendo objeto del siguiente epígrafe del presente capítulo de esta tesis.

Lu *et al.* (2005) estudian el caso en el que múltiples suministradores y múltiples consumidores intervienen en la cadena logística del mineral de hierro en unas instalaciones que actúan como elemento de concentración de cargas. El modelo trata de encontrar un óptimo económico considerando globalmente los costes de todos los agentes (puerto, transitarios y navieros).

Volviendo a la *McDuffie Coal Terminal* del puerto de Mobile (Alabama, Estados Unidos) ya estudiada por Park y Noh (1987a y 1987b); Harris *et al.* (2008) generan un nuevo modelo para evaluar las operaciones portuarias y proponer mejoras globales en la productividad. Como novedad estos autores aplican en su modelización las denominadas filosofías de “*lean manufacturing*”²⁸⁶, herramientas que tratan de encontrar todas aquellas actividades que no aportan valor y son ineficientes (“*wastes*”²⁸⁷) para eliminarlas, de manera que se comprima / optimice el

²⁸⁶ Estos sistemas fueron concebidos por el ingeniero industrial japonés Taiichi Ohno (1912-1990) en sus trabajos para la cadena de producción de automóviles de Toyota y que han venido también denominándose sistemas de producción *just in time* (siendo este último término quizá más conocido que el más académico de *lean manufacturing*). Estas técnicas se han empezado a emplear con éxito en campos tan diversos como la logística, las compras y aprovisionamiento, la gestión de inventarios, gestión de ciudades, educación, medicina y sistemas de cuidado de la salud, etc...

²⁸⁷ Generalmente los procesos ineficientes o “*wastes*” se engloban en siete categorías: 1) Sobreproducción (*Overproduction* – *Overprocessing*), 2) recursos improductivos y esperas (*Down time* – *Waiting*) 3) transportes innecesarios o ineficientes (*Transportation*), 4) producción inapropiada (*Innapropriate Processing*), 5) exceso inventarios (*Unnecessary Inventory*), 6) movimientos innecesarios o ineficientes (*Unnecessary Motions*) y 7) defectos / falta de calidad en la producción (*Defects*).

proceso y se entregue el mayor valor posible al cliente final con el mínimo coste / mínimos recursos. Para ello se basan en los proyectos de mejora que en el puerto habían implementado con anterioridad.

Para estos autores, los procesos ineficientes o “*wastes*” dentro de una terminal de carbón como la analizada son diversos y tienen que ver con procesos como los tiempos de preparación y de parada de la maquinaria, procedimientos de programación de medios no bien repartidos o irregulares (que producen medios sobrecargados y otros infrautilizados) o, movimientos de mercancía ineficiente (dobles remociones o transportes internos no productivos).

Los proyectos de mejora implementados por el puerto de Alabama (Estados Unidos) se basan en las técnicas *Kaizen*²⁸⁸ formuladas por el ingeniero japonés Imai Masaaki en la década de los 80 y que tratan de obtener mejoras continuas mediante la selección de acciones concretas, simples y de fácil implementación²⁸⁹. En el caso concreto de la terminal se habían detectado ocho proyectos de mejora de los cuales tres de ellos fueron elegidos para formar parte del experimento de modelización de Harris *et al.* (2008):

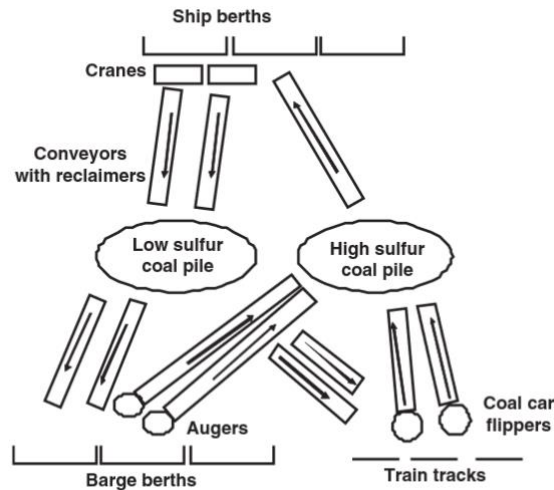
- *Keizan* 1: Proyecto para cargar barcazas en 60 minutos y desplazar las barcaza a la zona de cargas en menos de cinco minuto;
- *Keizan* 2: Proyecto para descargar un barco a unos ritmos de 35,000 Toneladas diarias; y
- *Keizan* 3: Proyecto para descargar barcazas en 60 minutos.

Conceptualmente construyen un modelo con el software ProcessModel con tres elementos de transporte: barcos (donde se transporta el carbón para su carga / descarga en muelles mediante grúas descargadores), barcazas o gabarras (también para transporte marítimo pero usualmente de menores dimensiones e ideadas para transporte fluvial) y los trenes (para entrada / salida de carbón por tierra). Se definen además dos zonas de almacenamiento (una de bajo contenido de azufre y otro con pilas de alto contenido de azufre) y un sistema de cintas desde las pilas de almacenamiento a los buques, barcazas o trenes. El modelo conceptual con los flujos se muestra en la ilustración 166.

²⁸⁸ *Kaizen* proviene de las palabras japonesas “Kai” (modificar / cambiar) y “Zen” (pensar como mejorar / hacer las cosas mejor).

²⁸⁹ Las técnicas de *lean manufacturing* y *Keizan* fueron descritas en Masaaki (1986), Nakajima y Bodek (1988), Ohno (1988), Shingo y Dillon (1989), Greif (1991) y Rother y Shook (1999). Para una moderna explicación de cómo aplicar simulación en técnicas de *lean manufacturing* también existe una reciente referencia de Schroer (2016).

Ilustración 166. Esquema conceptual de funcionamiento de una terminal de carbón para simulación .



Fuente: en Harris *et al.* (2008).

Los autores, en base al modelo, corrieron 9 escenarios de simulación con diferentes configuraciones / maquinaria llegando a la conclusión de cuáles eran los rendimientos medios que se obtenían y cuales cumplían mejor los criterios impuestos en base a los indicadores antes señalados como proyectos *Keizan 1*, *Keizan 2* y *Keizan 3*. En base a los mejores resultados investigaron cuales eran los cuellos de botella que solventaron en dos nuevos escenarios que corrieron como escenarios 10 y 11 en un proceso combinado de simulación-optimización.

Lodewijks *et al.* (2009) dedican sus estudios al análisis de los sistemas de cintas transportadoras de una terminal de mineral de hierro en Chennai (India), investigando mediante simulación la mejor configuración para una terminal de exportación. Estos autores estudian el tipo de cintas a utilizar y si es mejor utilizar rutas de transporte dedicadas o es mejor un diseño en la que parte de las cintas sean compartidas. De igual modo analizan escenarios con transbordo directo.

Dong y Liu (2009) se introducen en el campo de la modelización / simulación de terminales de graneles desde una posición crítica en la que indican que la excesiva simplificación para poder representar la realidad en un modelo con el que operar puede llevar a la obtención de resultados no precisos y que no se ajusten a la realidad modelizada. Técnicamente hacen un desarrollo *ad hoc* en Visual C++ que validan en una terminal de importación de mineral de hierro.

Boschert y Hellmuth (2010) utilizan en sus estudios una herramienta para el diseño de cintas transportadoras desarrollado por Siemens AG (software denominado '*simulation tool for conveying systems*') para el que presentan un caso práctico, pero, del que no ofrecen datos que permitan contrastar la bondad del diseño ofrecido por dicho software.

Roy y Bandyopadhyay (2010) utilizan una aproximación de tipo estocástico con el diseño de funciones de coste a través de las cuales investigan cinco alternativas diferentes para una terminal

de descarga de graneles sólidos buscando el óptimo de operación (como aquella de mínimo coste). El diseño teórico realizado por estos autores lo adoptan en una base experimental en el puerto de Calcuta (India).

Laih y Sun (2010) exponen un interesante trabajo que escapa de lo que otros autores venían presentando a la comunidad científica. En concreto, estos autores realizan un clásico modelo apoyado en teoría de colas que utilizarán sin embargo para investigar un esquema tarifario en una terminal de graneles sometida a congestión. Bajo este modelo y según los autores las llegadas aleatorias de los barcos se minimizan cuando se aplican esquemas tarifarios variables que promuevan llegadas que reducen las esperas (instrumentos de programación de *slots*). Bajo este esquema los operadores ajustan su logística y se minimizan costes de escala. El modelo sirve a los autores para comparar resultados entre una terminal sometida a este novedoso esquema tarifario y otra que no lo está y, predecir con ello las posibles decisiones de los propietarios de las cargas y armadores en el caso de que una política comercial como la indicada se pusiese en marcha.

Cigolini y Rossi (2010) y Cigolini *et al.* (2011 y 2013), primero de una manera teórica y después en una aplicación práctica, vuelven sobre el diseño de la flota óptima de barcasas en operaciones de transbordo en costa (offshore) y posterior transporte fluvial del material transbordado²⁹⁰. La base experimental de sus estudios es el tráfico de carbón suministrado a la central eléctrica de Porto Telle (Italia). Tras el análisis de 16 escenarios los autores recomiendan una composición determinada de flota²⁹¹, equipamiento y capacidad de la estación de transferencia²⁹² e incorporan un análisis económico en función de los ingresos del proyecto y el retorno / rentabilidad de las inversiones planteadas (ilustración 167 a ilustración 169).

En su ejercicio, estos autores utilizan la técnica de redes de Petri²⁹³ para el diseño conceptual del modelo que implementan mediante el lenguaje de programación Visual Basic sobre la que acoplan una base de datos en Microsoft Excel y una biblioteca de objetos *ad hoc* escrita en lenguaje de simulación ARENA®.

En el modelo se incluyen elementos novedosos como la afección de las condiciones meteorológicas, modificaciones de la programación o condiciones de tráfico introduciendo mecanismos de penalización considerando las llegadas esperadas de los buques (*expected vessel arrival time* o “EVAT”) *versus* las llegadas reales (*actual vessel arrival time* o “AVAT”) y también las desviaciones entre el tiempo estimado de carga o descarga (*expected time the vessel*

²⁹⁰ Los estudios de estos autores siguen la línea científica de los de Bhasi y Acharya (1997), Jagathy *et al.* (2001), Bhasi (2004) y Jagathy y Acharya (2007).

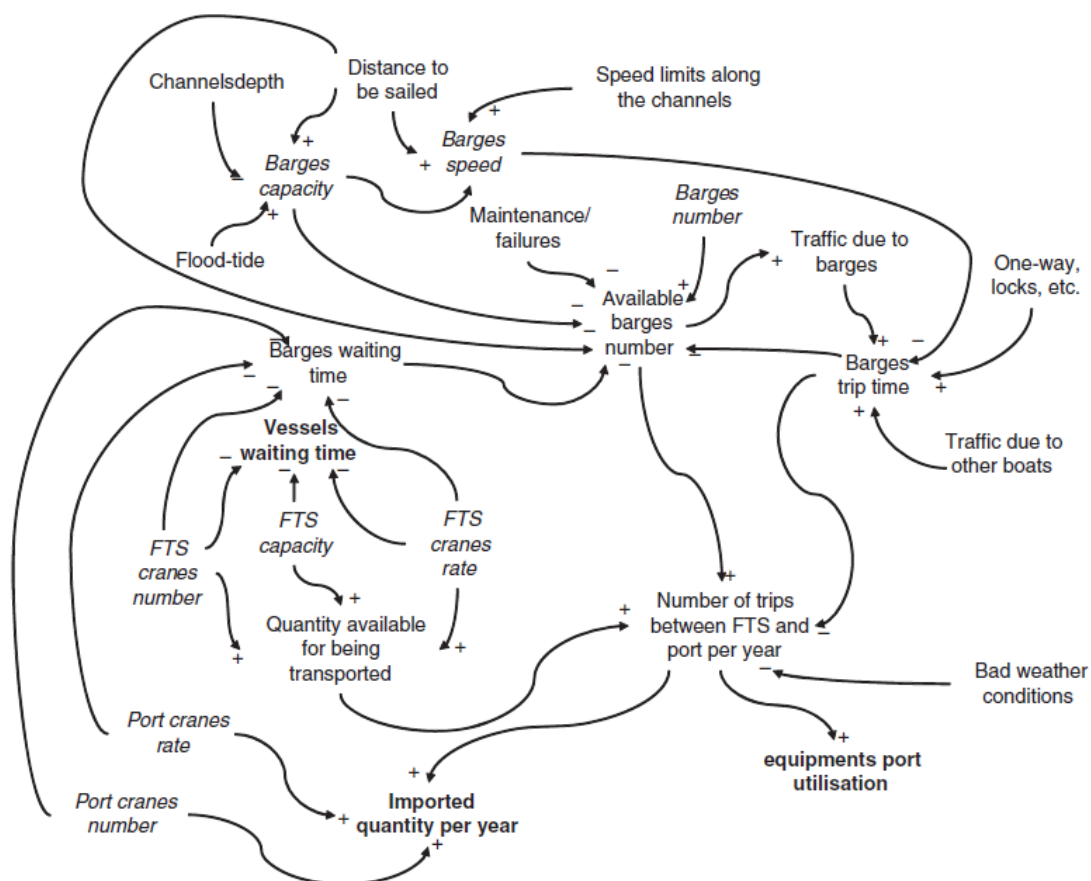
²⁹¹ Flota compuesta por cinco barcasas de 3.000 Tn. de capacidad.

²⁹² Instalación de 50.000 Tn. equipada con dos grúas de 1.800 Tn./h.

²⁹³ Una detallada explicación sobre Redes de Petri fue introducida por David y Alla (1994).

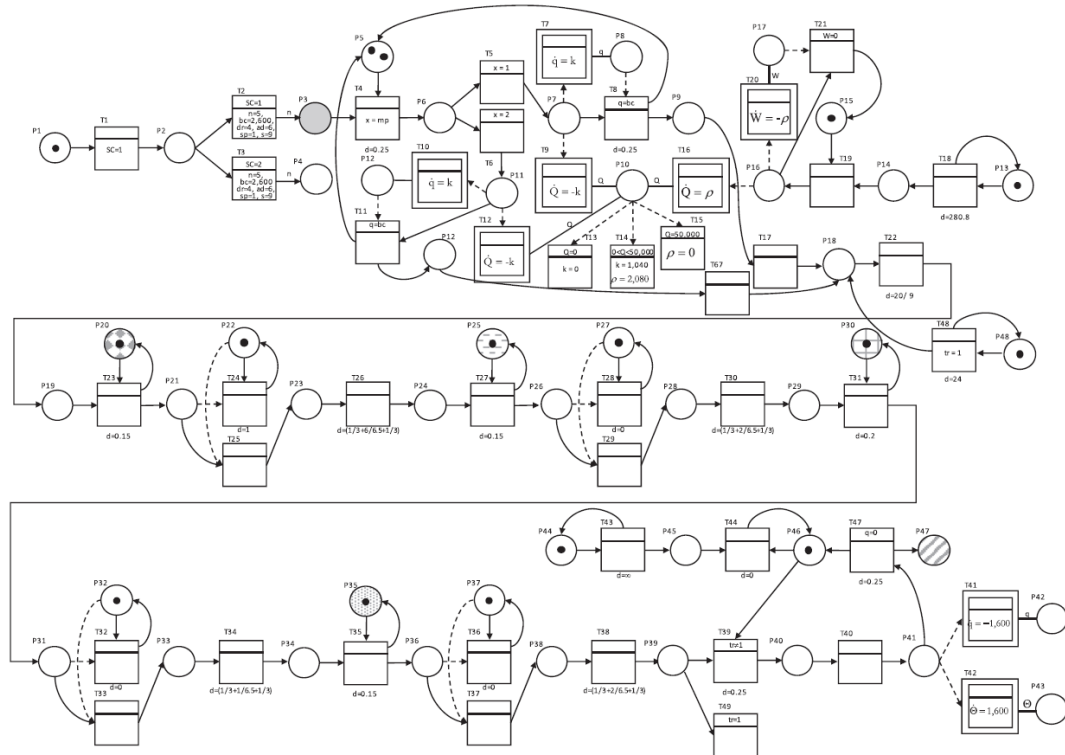
is fully loaded or unloaded “ETVFLU”) versus el tiempo real de carga o descarga (*actual time the vessel is fully loaded or unloaded* “ATVFLU”).

Ilustración 167. Relación entre las variables que afectan al problema de dimensionamiento de un sistema de barcazas – transbordo.



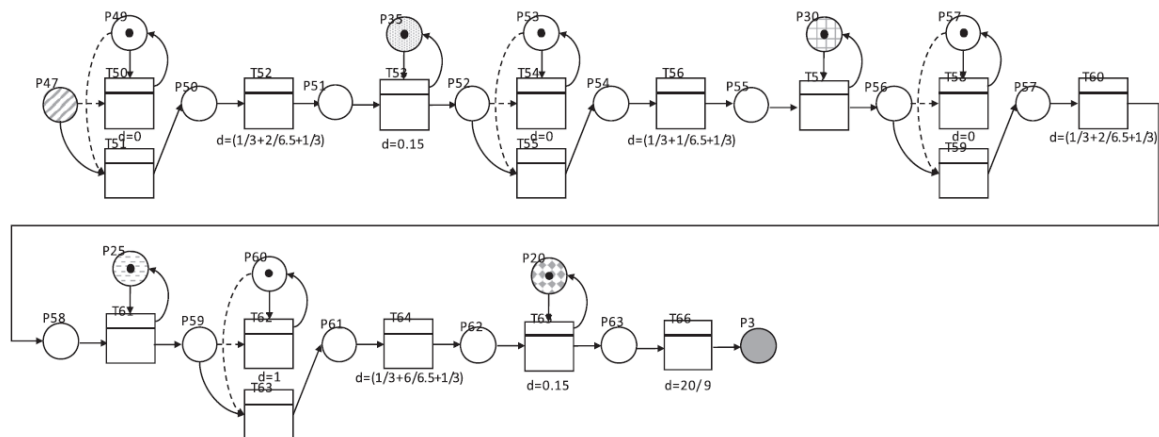
Fuente: Cigolini y Rossi (2010).

Ilustración 168. Modelo de transbordo de carbón (estación transferencia off-shore) y transporte con barcazas hasta puerto fluvial mediante Redes de Petri: Ida en carga.



Fuente: Cigolini *et al.* (2013).

Ilustración 169. Representación del modelo de transbordo de carbón (estación transferencia off-shore) y transporte con barcazas hasta puerto fluvial mediante Redes de Petri: Vuelta en lastre.

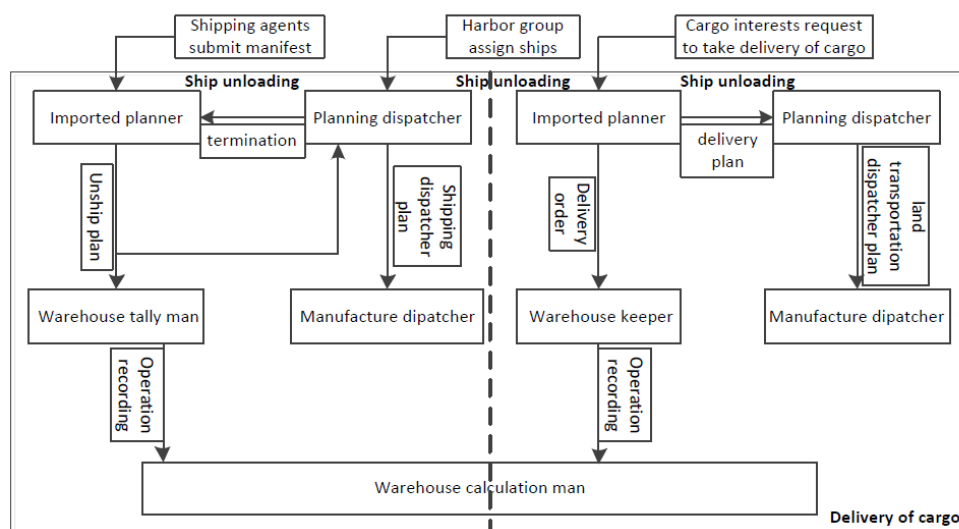


Fuente: Cigolini *et al.* (2013).

Wang *et al.* (2011) proponen un modelo con el que abordan la programación de medios de carga y descarga (que llaman *Berth Scheduling Problem* o "BSP") en una terminal de carbón bajo la demanda de llegada de buques buscando la máxima eficiencia al mínimo coste. Construyen para ello un algoritmo tipo *fuzzy* dinámico con el que aplican un método del tipo *Multiple-stage Decision* usando tecnología Web Services como soporte a un DSS (*Decision Support System*).

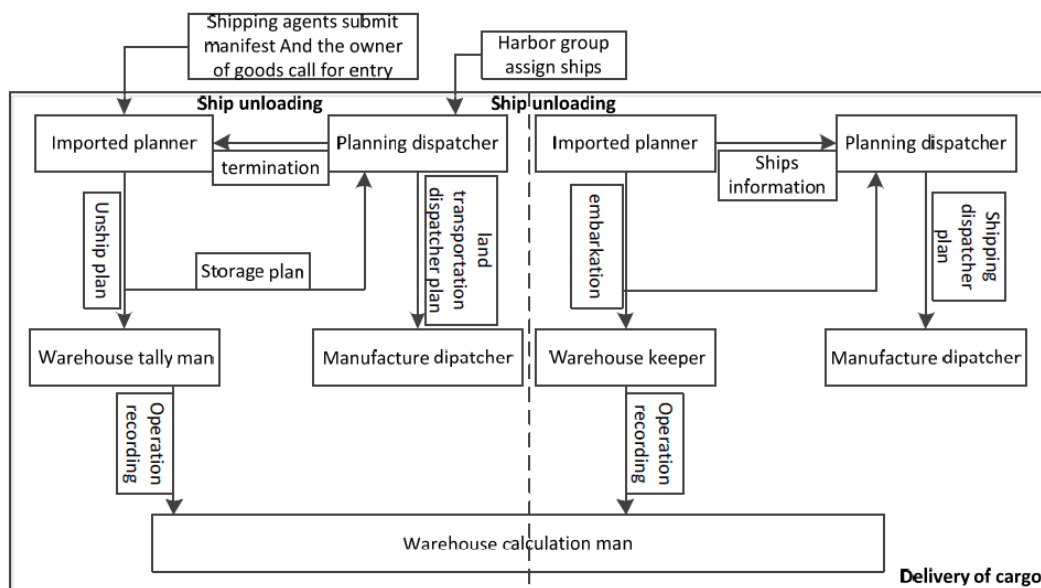
Estos autores aportan una descripción detallada del aparato matemático e incluyen comprensivos flujogramas del modelo soportados en un previo análisis de la lógica del proceso de importación (ilustración 170) y exportación (ilustración 171).

Ilustración 170. Lógica del proceso de importación en una terminal de graneles sólidos.



Fuente: Wang *et al.* (2011).

Ilustración 171. Lógica del proceso de exportación en una terminal de graneles sólidos.

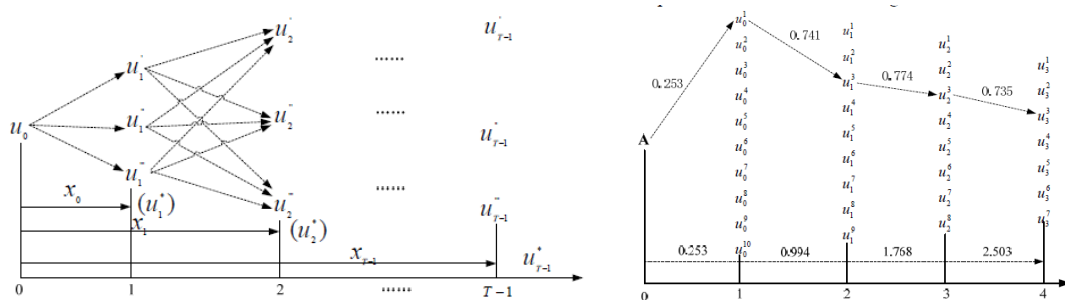


Fuente: Wang *et al.* (2011).

Tal y como explican Jhonson y Busemeyer (2001) los métodos denominados como “*multiple-stage decision*” son procedimientos que se basan en formular tareas de decisión que consisten en unas series de estados independientes pero que llevan a una resolución final. El responsable

de tomar la decisión debe decidir en cada estado cuál de las siguientes posibles acciones es la más conveniente para lograr un mejor resultado. Estos procesos suelen ser representados mediante arboles de decisión en los que los “*nodos*” representan los puntos en los que hay que tomar una decisión. A continuación se representa un ejemplo de árbol de decisión incluido en el propio artículo de Wang *et al.* (2011) donde se incluye el estado “T” en el proceso de decisión (izquierda de la ilustración 172) junto con su mejor camino (derecha de la ilustración 172).

Ilustración 172. Representación gráfica del método “Multiple-stage decision”.

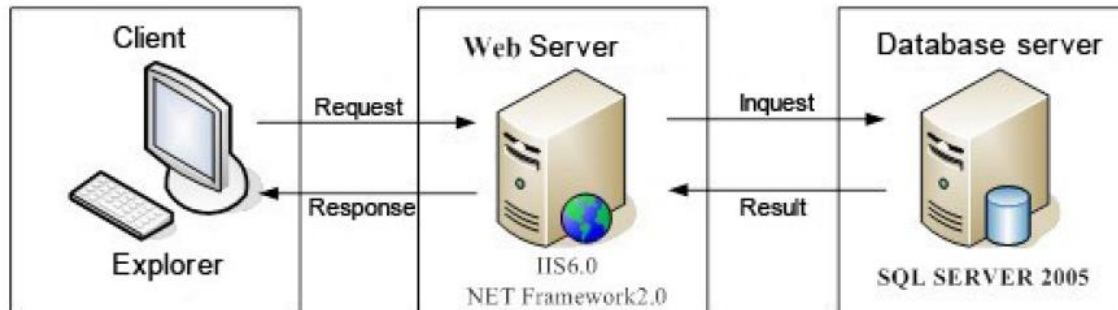


Wang *et al.* (2011).

La tecnología Web Services se estructura en una terminal cliente desde la cual el operador realiza las operaciones necesarias que se alimentan desde una base de datos residente en un servidor. Ambos, cliente y servidor, están interconectados mediante el servidor Web. La estructura y software de este meta-modelo utilizado por Wang *et al.* (2011) se muestran a continuación (Ilustración 173):

- IIS6.0+.NET Framework2.0 es la aplicación Web server utilizada.
- NET Framework es utilizado para recibir los requerimientos, completar los datos y tratamiento lógico de los mismos y devolver resultados al servidor.
- MS SQL SERVER 2005 es usada como base de datos.

Ilustración 173. Representación gráfica de la tecnología Web-server.

Fuente: Wang *et al.* (2011).

Cassettari *et al.* (2011) con la ayuda de un modelo de eventos discretos DES analizan una terminal de descarga de carbón de 3 millones de toneladas de capacidad que representa un subsistema dentro de una cadena logística global para alimentación de una central térmica. El objetivo del modelo es encontrar la solución óptima (de menor coste global) mediante una técnica de escenarios en el que se contemplan 1 ó 2 atraques y 2 ó 3 descargadores.

La simulación de naturaleza estocástica utilizada por estos autores (implementada sobre el simulador FlexSim 5.0.4) se combina con una técnica DOE (*“Design of Experiments”*) y RSM (*“Response Surface Methodology”*). Para la obtención de las superficies de respuesta utilizan el software *Design Expert 8.0* de *Stat-Ease*.

Su trabajo resulta en un meta-modelo en el que también utilizan la regresión existente entre distintas variables del modelo y cuyo objetivo es minimizar el coste de operación anual. Se incorpora también un análisis de la fortaleza / robustez de la solución adoptada en relación a la capacidad de la estación de transferencia intermedia del carbón que constituye uno de los elementos críticos de la cadena logística.

Umang *et al.* (2011) presentan un trabajo focalizado en la resolución del BAP en terminales de graneles. Para contrastar los resultados del modelo con datos reales se aplica el mismo al puerto de Saqr en Ras Al Khaimah (Emiratos Árabes Unidos). Realizan primero una comprensiva descripción de este tipo de terminales y su equipamiento así como un valioso resumen de la literatura publicada en relación al BAP que, fundamentalmente, se basa en la experiencia en terminales de contenedores.

Presentan sus variantes (BAP continuo, BAP discontinuo y BAP híbrido) y analizan las diferencias entre el caso del BAP aplicado a contenedores y el aplicable a graneles que se basan esencialmente en el *role* que juegan los sistemas de descarga y transporte del material a la explanada (cintas).

Técnicamente, desarrollan un modelo DES basado en técnicas MIP que describen con un buen grado de detalle en el trabajo. Utilizan el programa CPLEX 10.2 para testear los resultados del MIP.

Chen *et al.* (2011) centran su estudio más en el barco que en el puerto generando un modelo que ayuda a los armadores a diseñar los buques más efectivos (dimensiones y velocidad) considerando el mercado que quieren atender. Para ello construyen un esquema interactivo de tres niveles: i) el modelo de diseño; ii) el sistema logístico asociado al barco (*“the shipping system”*); y, iii) el sistema logístico portuario (*“the shore logistic system”*).

La optimización se aborda mediante técnicas de simulación Montecarlo con la ayuda del software *Crystal Ball* embebido en *Microsoft Solver* ©. Como base experimental de contraste utilizan el diseño de la flota de *bulk carriers* que transportarían mineral de hierro desde Tubarao (Brasil) a Beilun (China). El modelo de estos autores no sólo se utiliza para el dimensionamiento previo de la flota sino que se implementa en la futura operación de la flota y en la logística portuaria a modo de DSS.

Por su lado Bugaric *et al.* (2011) y más tarde Bugaric *et al.* (2012) realizan un estudio de capacidad de una terminal de graneles en un puerto fluvial del río Danubio²⁹⁴, sometiendo a modelización tres escenarios distintos. Los dos primeros en base a la configuración actual del puerto en dos sub-variantes, una en el que los dos sistemas de descarga actúan de manera coordinada (ayudándose entre sí) y otra en el que éstos operan de una manera independiente; y el tercero en un escenario de ampliación portuaria en el que un nuevo descargador se incorpora y se implementa una estrategia de coordinación parcial entre los tres elementos. Se trata por tanto de un modelo en el que se mezclan decisiones de inversión con estrategias de operación.

Como indicadores de productividad de cada escenario se emplean los clásicos tiempo de espera de buques y grado de ocupación de los atraques.

En realidad estos estudios son fruto de la investigación de este grupo de trabajo por más de una década (según citan los autores los estudios previos se desarrollan en el periodo 1995-2009) de los que habían presentado ya resultados parciales en Bugaric y Petrovic (2002 y 2007).

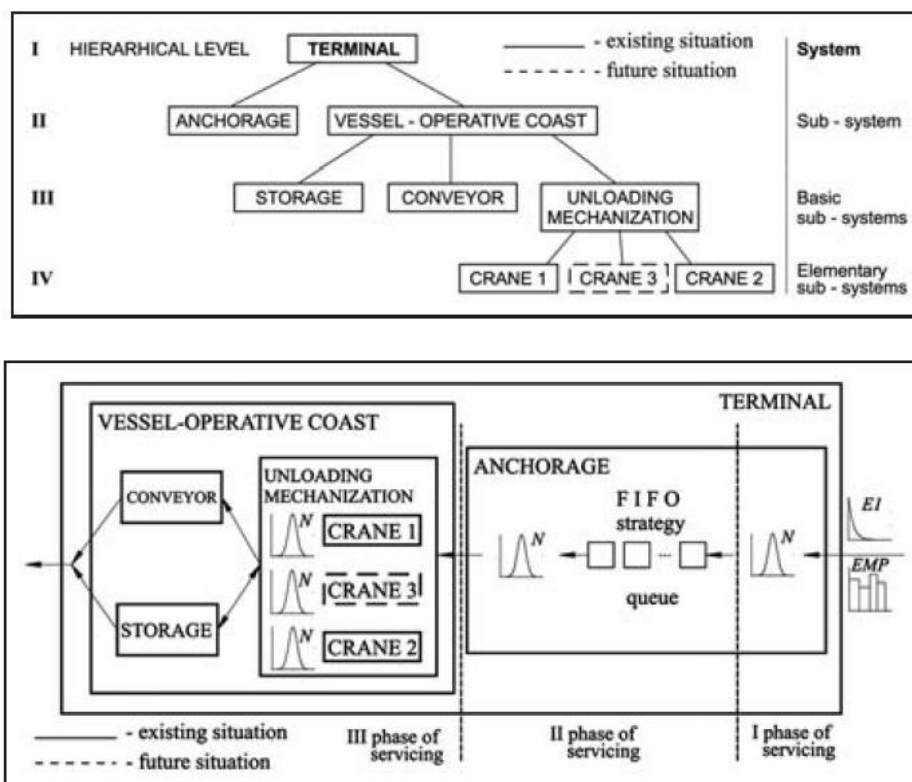
Estos autores comienzan dividiendo el “sistema” que representa la terminal en dos “subsistemas”: zona de atraque (donde se realizan las operaciones) y zona de fondeo (donde se forman las colas de buques que llegando a puerto no disponen de atraque).

El subsistema de atraque se descompone nuevamente en tres “subsistemas básicos” que son la zona de almacenamiento, las cintas de transporte de muelle a zona de almacenamiento y los

²⁹⁴ Conforme las estadísticas y datos aportados por los autores no es posible determinar cuál es la terminal pero indican que la misma es una terminal poli-producto en la que se manipula tanto carbón, como mineral de hierro y piedra caliza.

equipos de carga/descarga. Estos últimos son nuevamente subdivididos en tres subsistemas elementales que son cada uno de las grúas de manipulación (ilustración 174).

Ilustración 174. Descomposición jerárquica de sistemas y subsistemas y fases de servicio en la operación de una terminal de graneles sólidos.



Fuente: Bugaric *et al.* (2012).

Como elemento destacable, estos autores introducen en la operación de descarga de los buques dos estados diferentes. El primero que denominan de vaciado “libre” (“*free digging up*”) y que corresponde al 80% de la carga y al que asignan un ritmo de operación inicial (“ μ_1 ”), y el segundo de limpieza de bodegas (“*cleaning*”) al que asignan un ritmo de operación más bajo (“ μ_2 ”).

Esto responde con mayor precisión a la realidad observada en terminales de este tipo y será objeto de otros estudios posteriores como el de van Vianen (2014) sobre el que se volverá más adelante.

Las estrategias de cooperación de grúas que se introducían al principio se pueden resumir como sigue:

- Estrategia 1. No Cooperativa. Cada grúa queda asignada a un atraque específico y no se mueve del mismo descargando sólo barcos en este atraque.

- Estrategia 2. Cooperativa (al menos una grúa trabaja en condiciones de libre descarga). Si un medio está ocioso puede trasladarse al otro muelle y ayudar a la otra grúa en la descarga del buque siempre que (y hasta que) ese barco comienza la operación de limpieza de bodegas. Llegado este punto, si existe otro barco la grúa se traslada para comenzar la operación al otro muelle y deja a la grúa rematar la tarea de limpieza de bodegas.
- Estrategia 3. Parcialmente Cooperativa (al menos dos grúas trabajan en condiciones de libre descarga). Esta estrategia es mostrada gráficamente en la ilustración 175 extraída del propio artículo de Bugaric *et al.* (2012) y se podría describir como sigue:

Mientras que la grúa I se asigna al muelle 1 y la grúa III se asigna al muelle 2, la grúa II se mueve entre los dos atraques en función del estado de operación de cada uno de ellos (limpieza de bodegas o descarga libre).

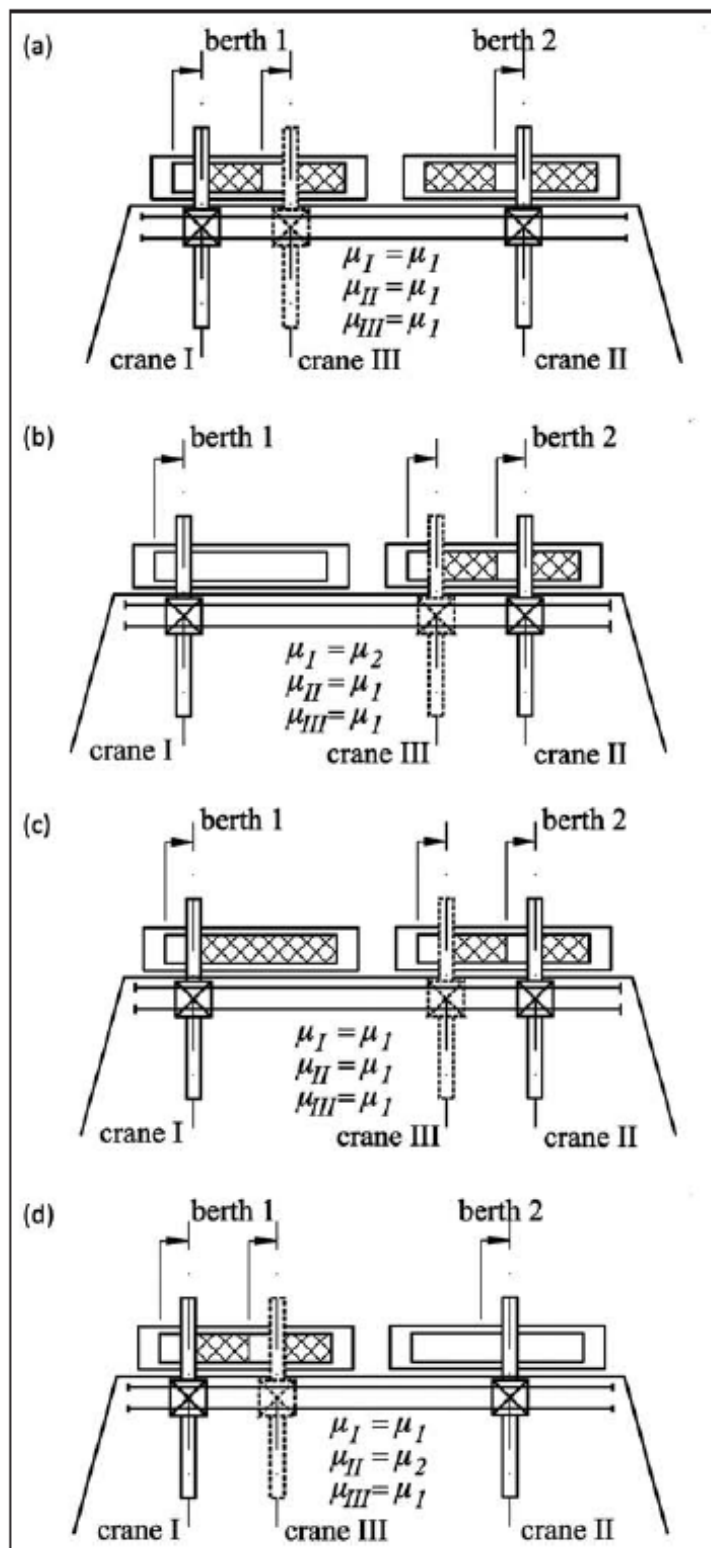
Así por ejemplo, al iniciar la descarga el buque 1 es servido con las grúas I y II y el buque 2 con la grúa III. Todas las grúas están operando en estado de libre descarga y los rendimientos obtenidos por tanto son los denominados “ μ_1 ” ($\mu_I = \mu_{II} = \mu_{III} = \mu_1$) (figura a en ilustración 175).

Cuando el primer buque ha alcanzado el 80% de la descarga empieza el estado de limpieza de bodegas, bajando su rendimiento a μ_2 . En este momento la grúa II se mueve a ayudar a la grúa III en el buque 2. Ambas grúas (la II y la III) operan bajo condiciones μ_1 mientras que la grúa I cambia a régimen μ_2 ($\mu_I = \mu_2$ y $\mu_{II} = \mu_{III} = \mu_1$) (figura b en ilustración 175).

Una vez que el buque 1 ha acabado la operación de limpieza de bodega, este abandona el atraque y entra un nuevo buque (buque 3 del sistema) quien empieza su operación en condiciones libres (μ_1). La grúa II se mantiene operando en el segundo atraque hasta que se alcanza el 80% de la descarga. En este estado nuevamente todas las grúas se encuentran trabajando al máximo rendimiento ($\mu_I = \mu_{II} = \mu_{III} = \mu_1$) aunque la grúa II se ha trasladado al segundo muelle si se compara con la primera configuración de operación (figura c en ilustración 175).

Una vez que el segundo buque alcanza el 80%, la grúa II vuelve a trasladarse al primer atraque para atender al tercer barco. Mientras éste opera a máximo rendimiento ($\mu_I = \mu_{II} = \mu_1$) el segundo atraque entra en zona de limpieza de bodegas ($\mu_{III} = \mu_2$). (figura d en la ilustración 175).

Ilustración 175. Esquema de cooperación parcial de grúas de descarga en una terminal de graneles.

Fuente: Bugaric *et al.* (2012).

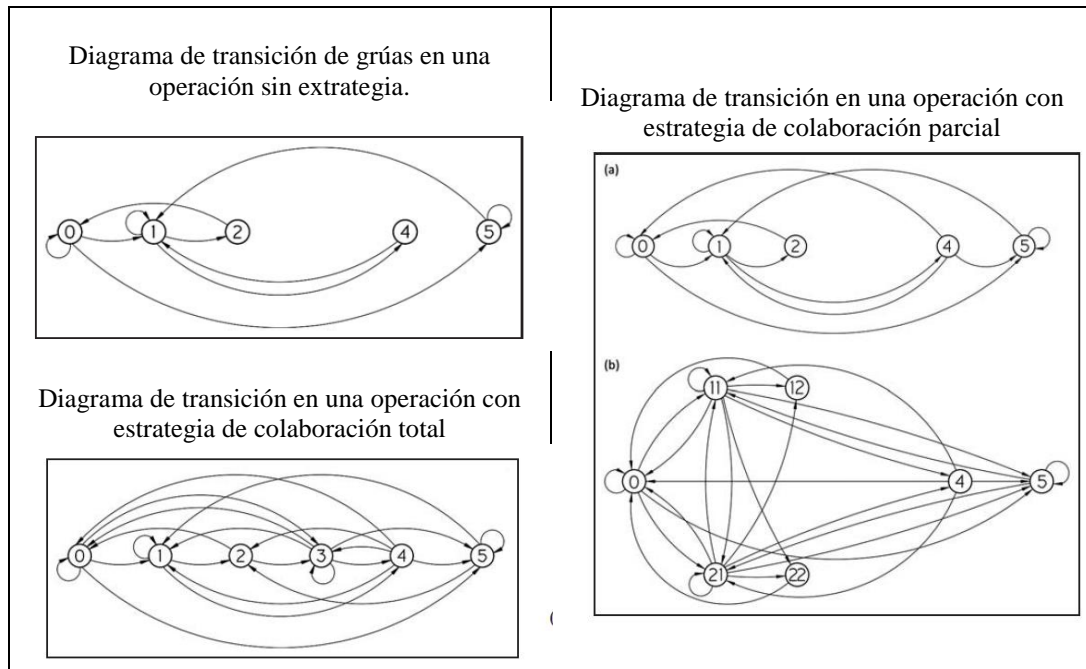
Desde el punto de vista técnico, estos autores hacen un desarrollo en PASCAL en el que las variables que alimentan el modelo se generan utilizando el método Montecarlo (variables estocásticas) o en base de datos registrados en terminales similares (variables deterministas).

En realidad, el modelo es una aplicación de la redes de colas con formación de sucesivas colas a la llegada de puerto (primera cola), ocupación de atraque (segunda cola) y asignación de medios de descarga (tercera cola).

Así, en este caso, cuando se genera una llegada de buque a puerto si la zona de fondeo está ocupada y no existe atraque libre para este barco, se rechaza la entrada en puerto. Si el fondeo está libre se da acceso a la misma y si el atraque está vacío se le da autorización de paso al muelle. Si el muelle está ocupado pero existe espacio en la zona de fondeo se procede a fondear el buque. En un tercer nivel se presentan las colas de asignación de los medios de descarga (ilustración 176).

Mientras el tiempo de llegada entre buques al sistema se modeliza mediante una distribución exponencial, el tiempo de servicio de los buques lo hace mediante distribuciones normales con distintas medias (μ_1 o μ_2) en función del estado de operación (libre descarga o limpieza de bodegas) tal y como se ha visto con anterioridad. Para los criterios de asignación de atraque se siguen políticas FIFO.

Ilustración 176. Diagrama de transición de grúas con diferentes estrategias de colaboración.



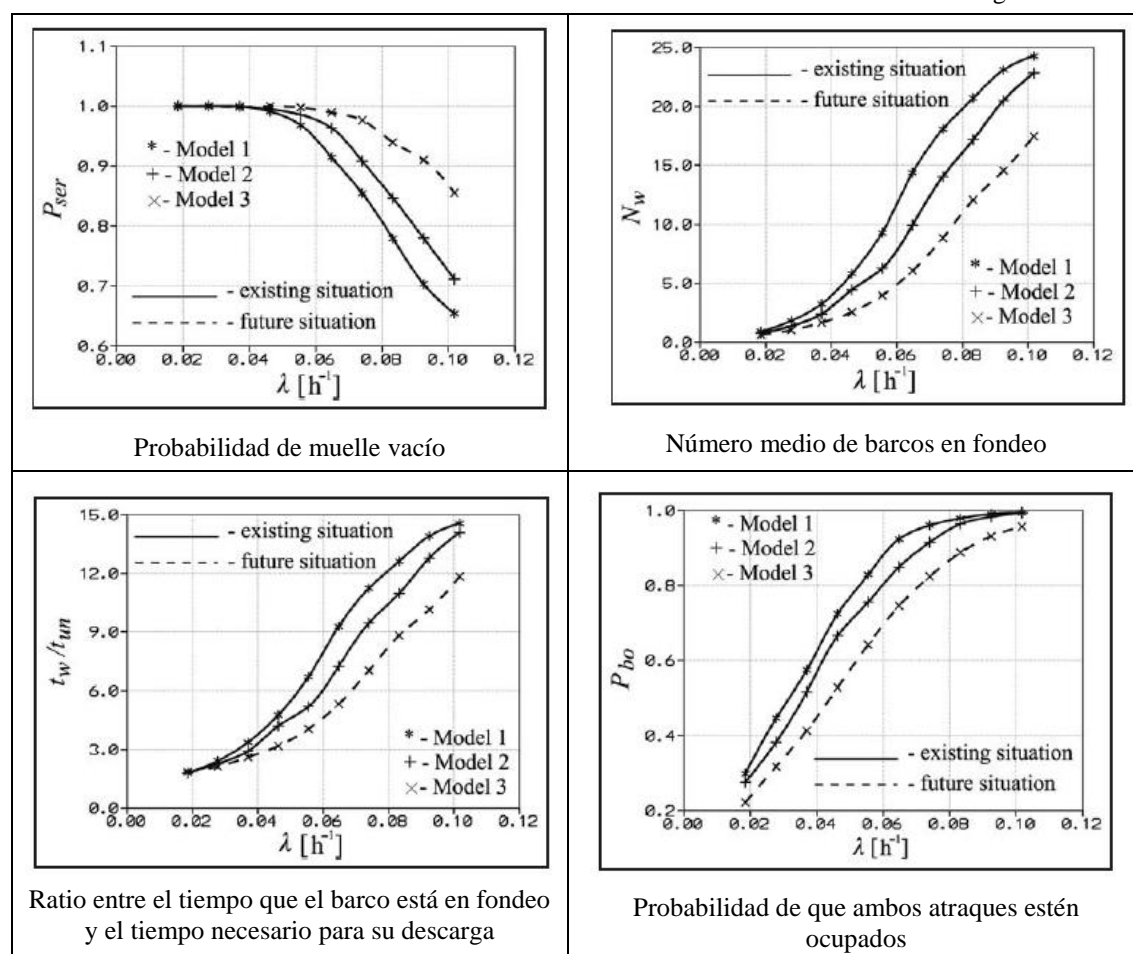
Fuente: Bugaric *et al.* (2012).

Estos autores conclúan que los mejores resultados en lo que se refiere a mínimos tiempos de espera y longitudes de cola, esperas relativas, etc... se obtenían (como era de prever) en el tercer escenario con una grúa adicional. Sin embargo una mejora sustancial se conseguía sin coste con

la adopción de adecuadas estrategias de operación (estrategia cooperativa frente a no cooperativa), siendo un buen ejemplo del *upgrading* que se pueden emprender en esta terminales y que ya se habían citado al referenciar a Lodewijks *et al.* (2009).

Se muestran a continuación a efectos ilustrativos (ilustración 177) ejemplos de los resultados obtenidos por estos autores.

Ilustración 177. Presentación de resultados de modelización de una terminal fluvial de graneles.



Fuente: Bugaric *et al.* (2012).

Vieira *et al.* (2012) estudian el BAP en terminales de graneles incluyendo como elemento relevante los diferentes estados operativos impuestos por el régimen de mareas. Este aspecto suele ser condicionante en un buen número de terminales de este tipo. Establecen una regla de prioridad en la asignación de atraque basado no sólo en las mareas sino en el nivel de stocks de cada producto, algo consistente con la logística habitual de terminales de este tipo asociados a procesos industriales o productivos concretos donde el consumo (o producción) de cierto material se materializa de manera continua (lo que hace aumentar o incrementar también de una manera pseudo-continua el material almacenado). En un segundo plano de prioridad dejan la optimización

del grado global de utilización del muelle, demoras, tiempo total de servicio en un horizonte de planificación determinado, etc...

Se trata de un modelo DES utilizando técnicas MIP construido sobre el software comercial CPLEX y con la implantación de un algoritmo *greddy* (“*greedy heuristic*”) que podría ser englobado dentro la familia GRASP (“*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*”).

En una interesante colección en la que los autores van repasando cada elemento de una terminal de graneles operada mediante cintas, van Vianen *et al.* (2012b) y más tarde van Vianen *et al.* (2014b) dedican sus esfuerzos al dimensionamiento de la zona de almacenamiento (*stock-yard*). Estos mismos autores en van Vianen *et al.* (2014a) centrarán sus estudios en la reprogramación de los *stacker-reclaimer*, mientras que en van Vianen *et al.* (2015) se centrarán en el dimensionamiento de las cintas de transporte del material. Parten estos estudios de un análisis descriptivo de las características de este tipo de terminales incluido en van Vianen *et al.* (2011).

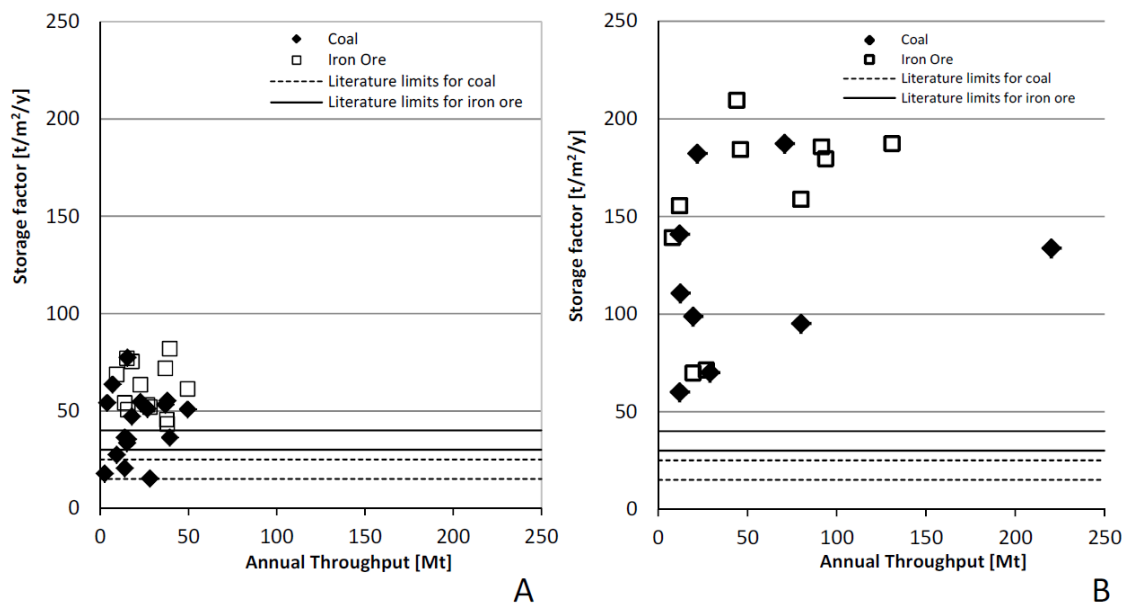
En los primeros estudios de los citados en el párrafo anterior (los que discuten sobre la capacidad de la zona de almacenamiento) los autores explican como el factor de almacenamiento (o *storage factor*) es el indicador que, usualmente, se ha utilizado para dimensionar de una manera analítica una terminal. Dicho factor es el resultado de dividir la capacidad de la terminal por la superficie de almacenamiento (resultando por tanto un indicador del tipo $Tn/m^2/año$).

Sin embargo, continúan estos autores indicando como este factor de almacenamiento es muy variable en las 49 terminales existentes analizadas en estudios anteriores de van Vianen *et al.* (2011) y, que a su vez, difieren de valores comúnmente aceptados por la industria como criterios de pre-diseño como los que proporcionan Ligteringen (2000): 15-25 $Tn/m^2/año$ para el carbón y 30-40 $Tn/m^2/año$ para el mineral de hierro (ilustración 178).

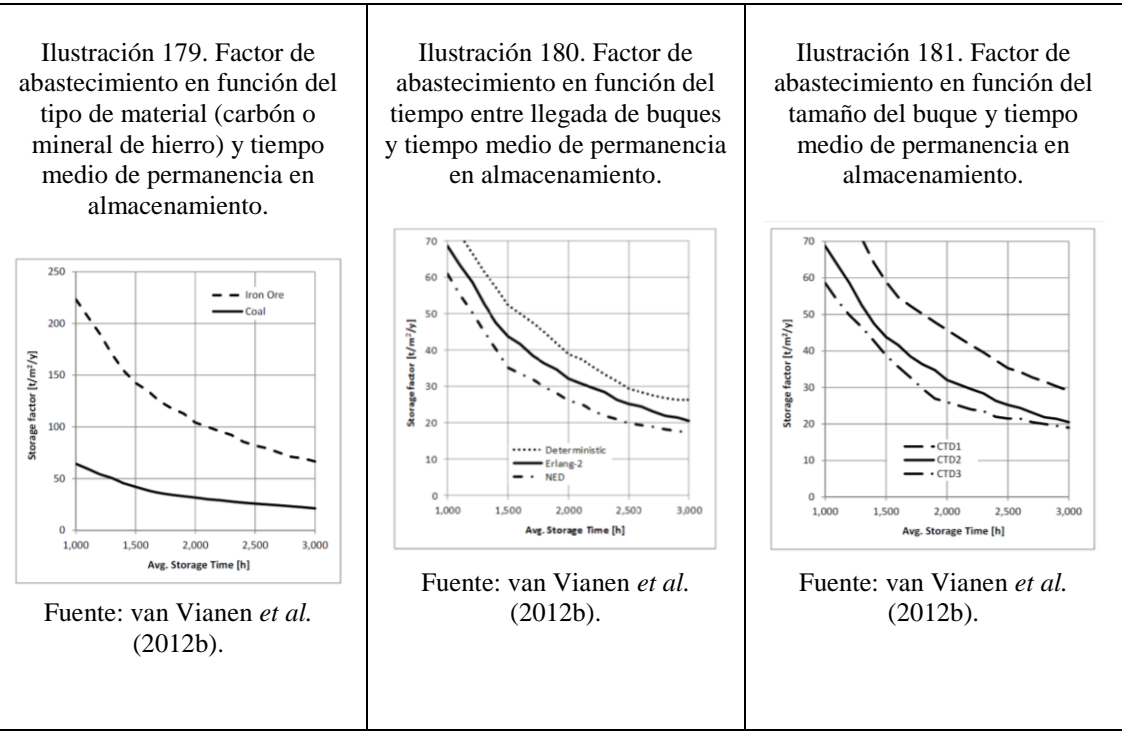
Huyendo de estas soluciones deterministas los autores plantean en van Vianen *et al.* (2012a) un modelo DES sobre el que investigan como afectan en la capacidad de la terminal (y en su factor de almacenamiento) variables tales como el tiempo medio de permanencia del material en la terminal (que en primera instancia fijan como un elemento determinista), las dimensiones de *bulk carriers* que utilizan las instalaciones (que representa mediante una función de distribución estocástica), la distribución de llegadas a la terminal que, apoyándose en van Vianen *et al.* (2012a), representan como una función de distribución exponencial negativa, otra de Earlang de fase 2 o E_2 y una determinista) y el tipo material que llega a la misma (las dos primeras representadas mediante funciones de distribución estocásticas) (ilustración 179 a ilustración 181).

Posteriormente, van Vianen *et al.* (2014b y 2015), dejan la influencia de otros parámetros relevantes como son la política de apilado (separación de materiales por tipos y características), la afección en la variación de los tiempos medios de permanencia en la terminal (abandonando su definición determinista de los primeros estudios para representarlo mediante una función de distribución estocástica) o el propio tamaño de la pila.

Ilustración 178. Factor de almacenamiento ($Tn/m^2/año$) en terminales de carbón y mineral de hierro.



Fuente: van Vianen *et al.* (2012b).



En van Vianen *et al.* (2012c) se aborda el estudio de una terminal de graneles sólidos (carbón y mineral de hierro) centrándose en las rutas para transportar el material desde/hacia buque a/desde zona de depósito (típicamente con cintas transportadores). Estos autores construyen un modelo (que llamaran *Dynamic Planner*) para que funcione como un elemento de apoyo o DSS ayudando

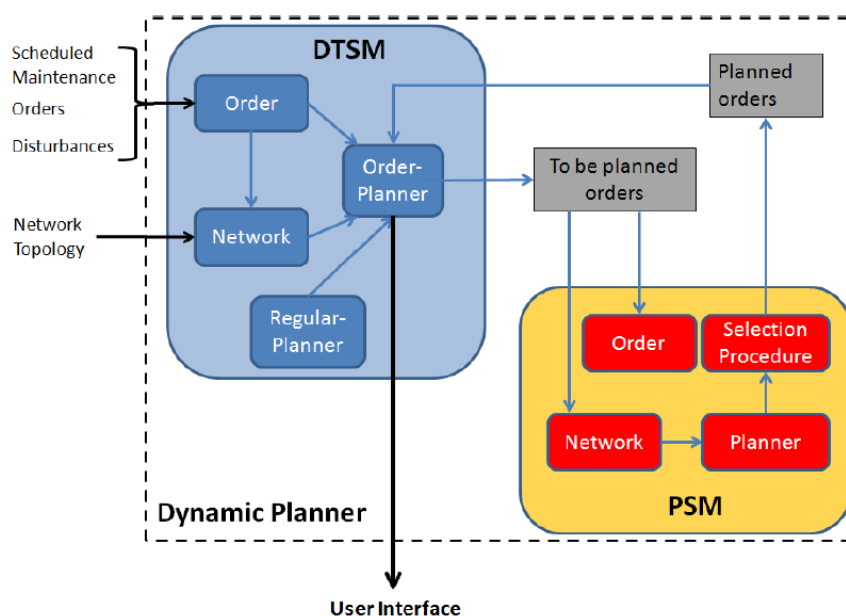
al operador de la terminal a tomar en cada momento la mejor decisión de operación. Se trata por tanto de un modelo de detalle en el plano operacional.

Para los autores, las decisiones en las terminales hoy en día se toman basándose exclusivamente en la experiencia de los operadores, mientras que la complejidad de un problema sometido a muchas incertidumbres (llegada de los barcos, llegada de trenes o camiones a la terminal, imprevistos provocados por el propio funcionamiento de la terminal, etc...) y en el que las consecuencias y repercusiones de malas decisiones puede ser económica y operativamente muy costosa, aconsejan la instalación de procedimientos de ayuda a la toma de decisión.

Los autores trabajan nuevamente con un modelo de eventos discretos DES conocido como TomasWeb y que está diseñado sobre Delphi 2010²⁹⁵. La arquitectura del sistema se estructura sobre dos modelos independientes pero interconectados denominados DSTM (*“Dynamic Terminal Simulation Model”*) y PSM (*“Planning Simulation Model”*). En el primero se modeliza la situación real de la terminal en cada momento y consta de cuatro módulos (*order*, *network*, *order-planer* y *regular-planner*) cuya descripción detallada se proporciona en la fuente bibliográfica citada. En el segundo se crea una auténtica red de cintas y se procede a escoger las rutas más adecuadas en cada momento en función de los datos de entrada (este modelo cuenta también con cuatro subrutinas de trabajo que los autores denominan *order*, *network*, *selection-procedure* y *planner* y que describen adecuadamente en el artículo). La arquitectura del sistema tal y como la presentan los autores se muestra en la ilustración 182.

²⁹⁵ TomasWEB es un software de libre acceso que permite modelización orientada a objetos mediante paradigma DES que fue desarrollado por Hans P.M. Veeke y Jaap A. Ottjes de la Universidad de Delft (Holanda) y que se implementa sobre Delphi. Para más información sobre TomasWeb puede consultarse la página web de sus desarrolladores referenciada en TomasWeb (2016) o una descripción del sistema presentada por Duinkerken *et al.* (2002) en el Winter Simulation Conference del año 2002. Por su parte, para más datos sobre Delphi 2010, plataforma sobre el que se desarrolla TomasWeb, puede consultarse Delphi (2016).

Ilustración 182. Arquitectura del DSS (*Dynamic Planner*) para la gestión de terminales de graneles sólidos y selección de enrutamientos de mercancía en el interior de la terminal.



Fuente: van Vianen *et al.* (2012c).

Los autores contrastan su modelo con casos experimentales concretos, en particular con la operación de la terminal de graneles sólidos denominada EMO del puerto de Rotterdam (Holanda). Dicha terminal es la mayor terminal de carbón y mineral de hierro del oeste de Europa (según datos consultados en la página web oficial de la compañía disponen de una capacidad de manipulación diaria de 200.000 toneladas y en el año 2015 superaron los 20 millones de toneladas de carbón y los 13 millones de toneladas de mineral de hierro).

Como interesante conclusión de los estudios, los autores indican que si bien en general las decisiones de *Dynamic Planner* coinciden con las tomadas por un operador experimentado, en otras ocasiones, el sistema proporciona mejores soluciones que las que toma el operador.

Mondragón *et al.* (2012) presentan un moderno enfoque de utilización de las tecnologías de información en ambientes portuarios²⁹⁶. En concreto estos autores centran sus esfuerzos en generar un modelo para operar mediante tecnología *wireless* (concretamente en su variante “DSRC” de “*Dedicated Short Range Communication*”) los vehículos de transporte interno / transporte horizontal de una terminal de graneles sólidos. Estos autores sin citar la terminal sobre

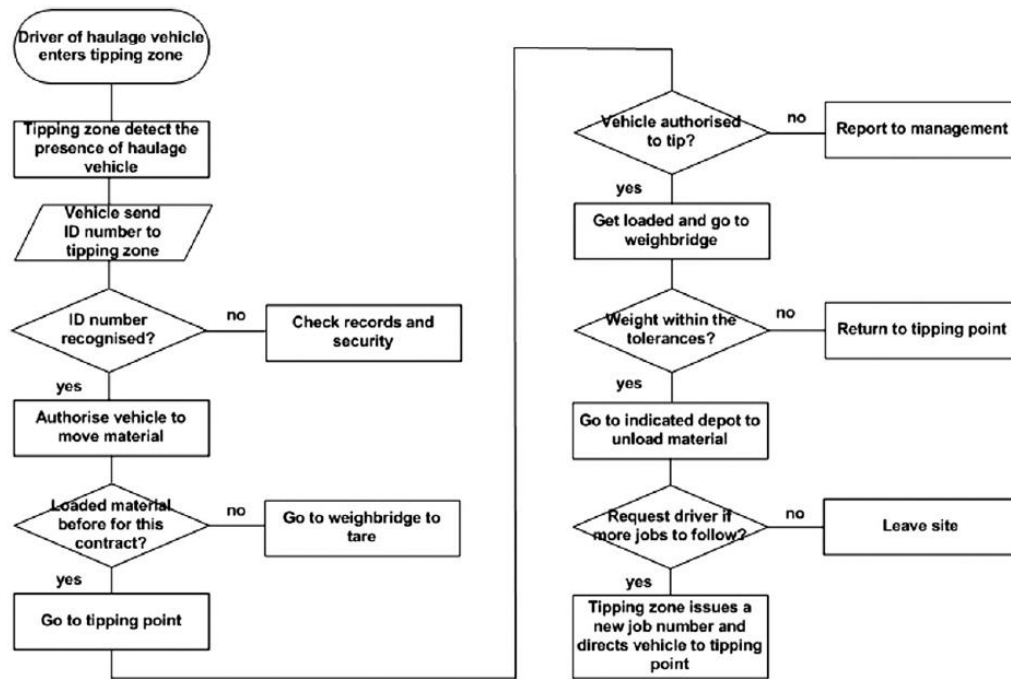
²⁹⁶ Una interesante compilación de sistemas de información utilizados en ambientes portuarios puede encontrarse en Heilig y Voß (2016).

la que implementan el modelo²⁹⁷ la describen como una terminal de pequeñas de dimensiones compuesta por dos atraques uno principal de 300 metros y otro auxiliar de 198 metros con unas explanadas de 30.000 m² en la que operan barcos de hasta 38.000 Tn de peso muerto.

Estos autores incluyen los diagramas de flujo (ilustración 183), del modelo multicapa (ilustración 184) y el esquema conceptual en las que se basa la arquitectura del modelo (ilustración 185). Sin embargo, se trata de un modelo teórico del que no ofrecen resultados prácticos o indicadores de rendimiento que permitan evaluar las mejoras que introducen dichos sistemas *wireless* en la gestión de la terminal. Este es sin duda un futuro y prometedor campo de investigación.

Desde el punto de vista técnico utilizan como herramienta OPNET.

Ilustración 183. Diagrama de flujo en los procesos de cargado de vehículos en una terminal de graneles.



Fuente: Mondragón *et al.* (2012).

²⁹⁷ Indican, eso sí, que se encuentra en la región de Humber en el Noreste de Inglaterra.

Ilustración 184. Modelo multi-capa en el proceso de cargado de vehículos en una terminal de graneles.

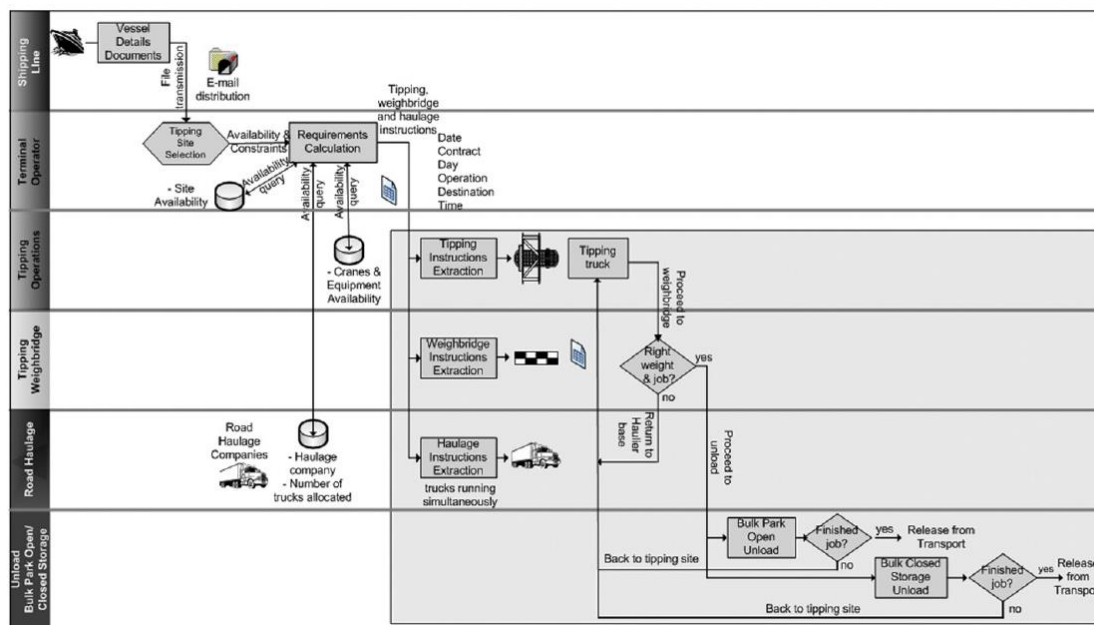
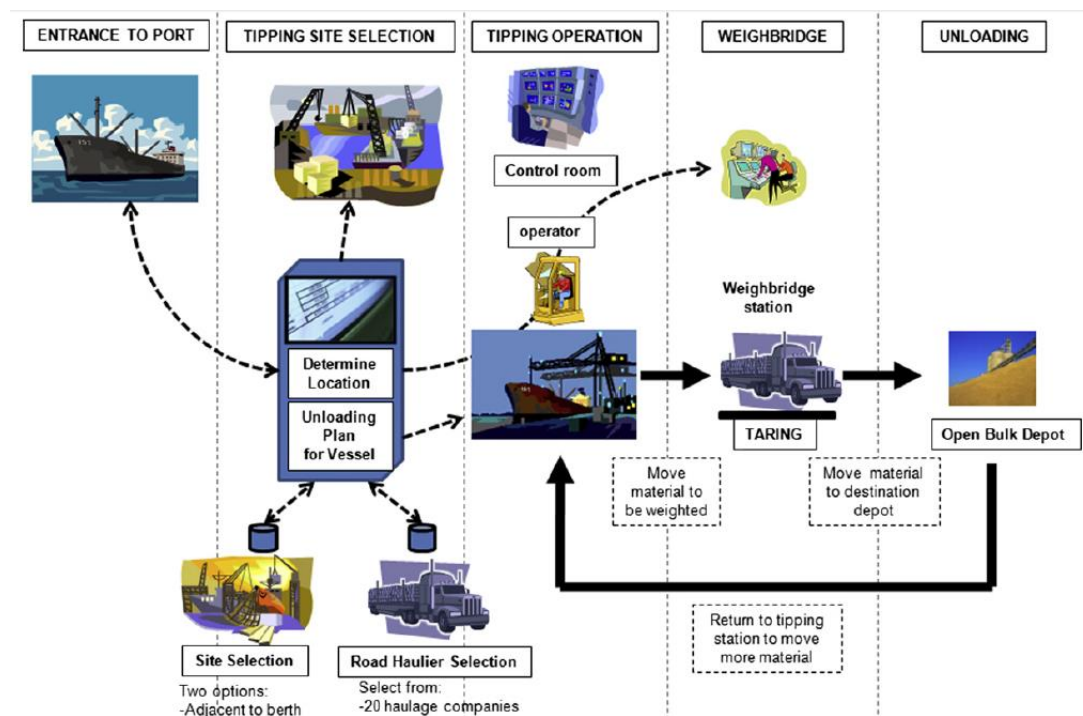
Fuente: Mondragón *et al.* (2012).

Ilustración 185. Esquema conceptual de descarga de graneles.

Fuente: Mondragón *et al.* (2012).

Saliendo de los tradicionales campos de terminales de mineral de hierro o carbón, Racero *et al.* (2013) abordan en un texto académico pensado para la docencia en técnicas DES, el diseño conceptual que sería necesario abordar en una simulación de una terminal portuaria dedicada a la importación de grano.

Si bien no presentan resultados experimentales que se puedan contrastar, se señala este estudio tanto por el hecho de que se sale del clásico análisis de terminales de carbón o mineral de hierro como por el hecho que el mismo se presenta de una manera didáctica. En la ilustración 186 se presenta el grafo de eventos, en la ilustración 187 el diagrama del ciclo de actividades en la terminal y en la ilustración 188 el modelo simplificado que subyace en el ejercicio de simulación de dichos autores.

Este modelo simple presenta un conjunto de simplificaciones como serían:

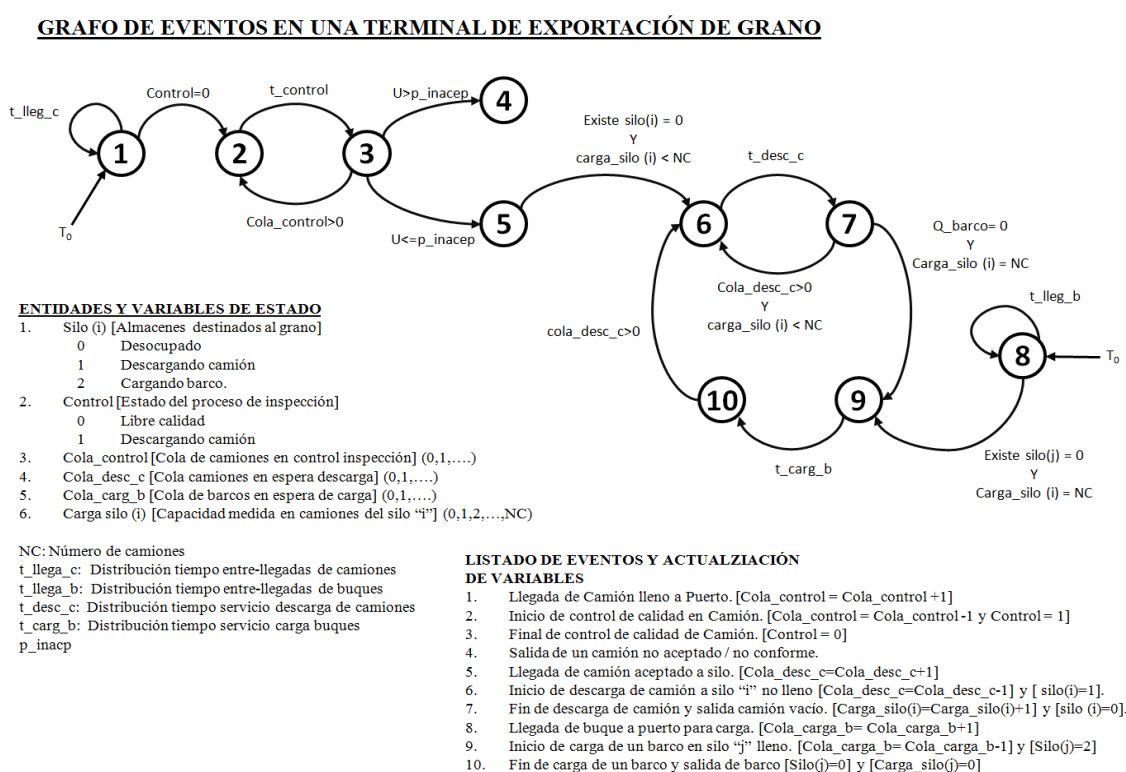
- La terminal tiene “i” silos de la misma capacidad;
- Todos los silos tienen la misma capacidad, que se mide a través de un número determinado de camiones que se denominará bajo la variable “NC”;
- A la terminal van accediendo camiones que son sometidos primero a un control de calidad antes de proceder a su descarga. El porcentaje de rechazo es un estadístico determinista (fijo) representado a través de la variable “p_inacp”;
- En el caso de que el grano sea aceptado se asigna dicho camión a un silo no lleno. Concretamente se asigna el grano al último silo que se vació (orden de prioridades de asignación de silo FIFO);
- Los camiones que lleguen a puerto proceden directamente a descargar en el silo asignado. Si todos los silos estuviesen llenos, el camión esperaría a que llegase un barco, se descargase un silo y hubiese hueco para la descarga del mismo.
- Los buques llegan a puerto y proceden al atraque sólo si existe un silo lleno. En otro caso esperan en cola a que se llene el silo.
- La cola de buques no se produce por ningún otro factor limitante (se entiende que siempre que haya un silo lleno hay atraque disponible y no se producen demoras por otros aspectos tales como disponibilidad de remolque, prácticos o amarre).

Con estas hipótesis, es necesario conocer los estadísticos de distribución que se aplicarán a los tiempos entre-llegadas tanto de camiones (“*t_lleg_c*”), como de buques (“*t_lleg_b*”), y a los tiempos de servicio tanto en la descarga de camiones (“*t_desc-c*”) como en la carga de buques (“*t_carg_c*”); pudiendo definir como fijo el tiempo de control de calidad e inspección previo a la descarga (“*t_control*”).

Bajo este modelo tendremos, por tanto, una serie de colas como son las de los buques a la espera de ser cargados (representada por ejemplo bajo la variable de cola de barcos " Q_{barcos} "), la de los barcos a la espera de que se pueda proceder a su control de calidad (" $cola_control$ ") o a su descarga en silo (" $cola_desc_c$ ").

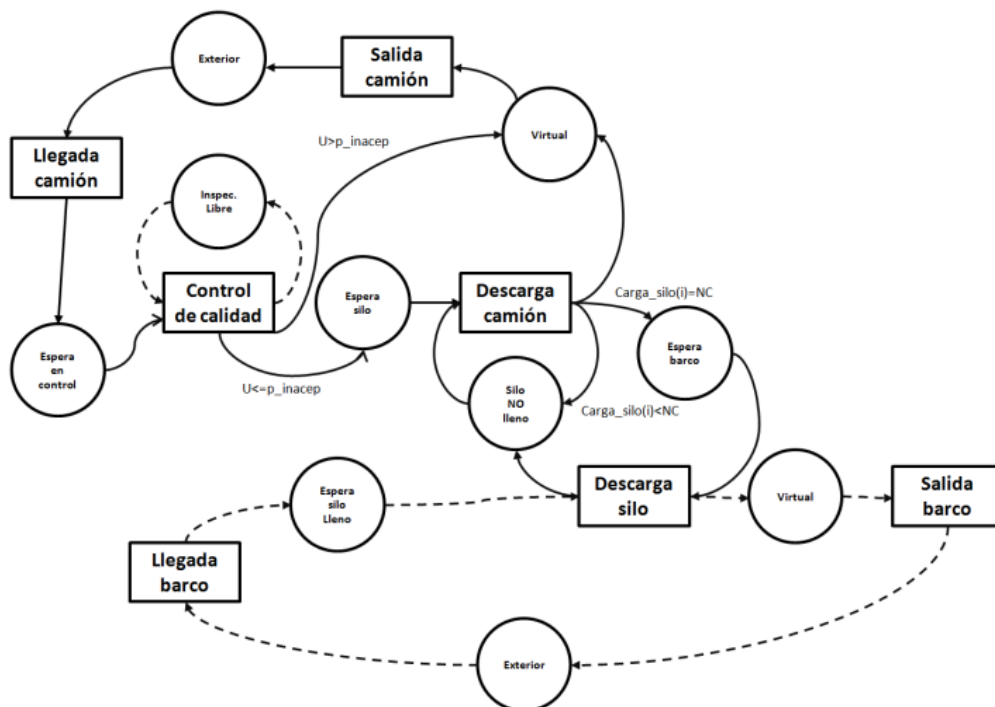
Siempre que el volumen que haya en un silo (" $Carga_silo(i)$ ") sea inferior al necesario para la carga de un buque (que se ha definido como " NC ") ese silo se sigue cargando y no se autoriza la entrada de un buque en el mismo.

Ilustración 186. Grafo de eventos de una terminal de exportación de grano.



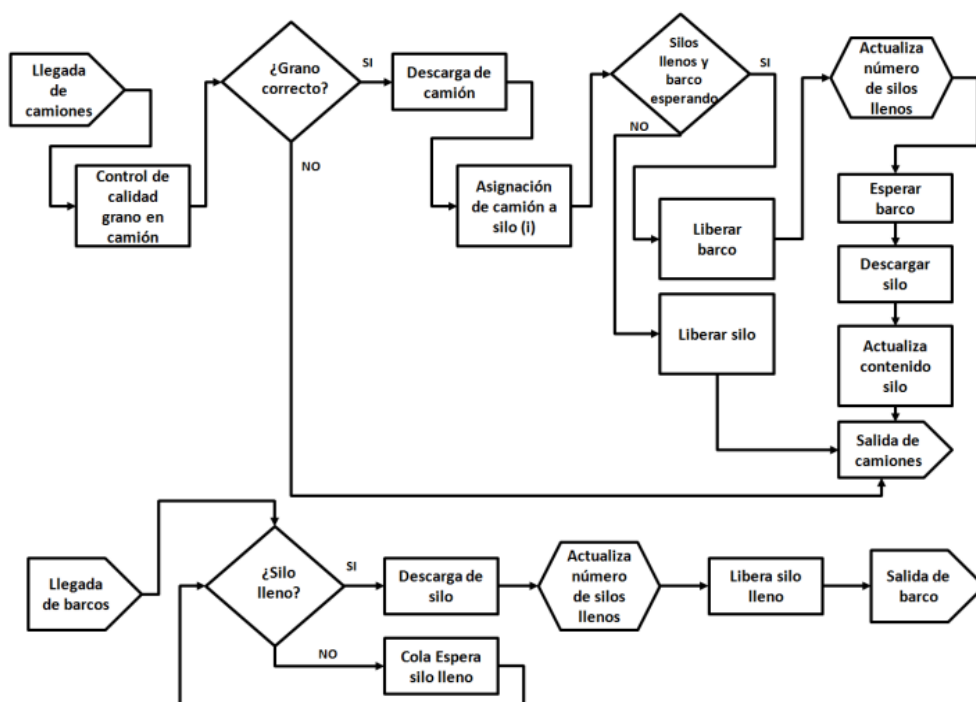
Fuente: Elaboración propia desde los datos aportados por Racero *et al.* (2013).

Ilustración 187. Diagrama del ciclo de actividades de una terminal de exportación de grano.

DIAGRAMA CICLO ACTIVIDADES EN UNA TERMINAL DE EXPORTACIÓN DE GRANO

Fuente: Elaboración propia desde los datos aportados por Racero *et al.* (2013).

Ilustración 188. Modelo simplificado de una terminal de exportación de grano.

MODELO DE UNA TERMINAL DE EXPORTACIÓN DE GRANO

Fuente: Elaboración propia desde los datos aportados por Racero *et al.* (2013).

Sayareh y Ahouei (2013) utilizan por primera vez en ambiente portuario las técnicas de estimación de modos de fallo y análisis de efectos (conocidos en literatura anglosajona como métodos FMEA de “*Failure Mode and Effect Analysis*” y a veces traducido al español como análisis modal de fallos y efectos o “AMFE”²⁹⁸) combinados con Análisis Pareto y Diagramas Causa – Efecto.

Comienzan analizando con cierto grado de detalle los orígenes o causas de los retrasos entrando en su cuantificación y análisis de riesgos mediante técnicas RPN (*Risk Priority Numbers*) como base para introducir una priorización en las soluciones a adoptar para resolver los problemas identificados.

Con las técnicas FMEA se trata de identificar los modos de fallo potenciales antes de que puedan aparecer, analizando las causas que pudieran producirlos, cuantificando los efectos que tendrían y con todo ello proponiendo métodos para solventarlos o analizar el riesgo inherente que se asume si no se mitiga²⁹⁹. En este caso, la probabilidad de presentación del modo de fallo (ocurrencia) y la cuantificación de sus efectos (severidad) son dos datos fundamentales del modelo para evaluar la implantación, o no, de medidas de mitigación o eliminación.

Por ejemplo, si un modo de fallo tuviera una probabilidad de ocurrencia muy baja con unas consecuencias bajas y el coste de eliminación fuese muy alto probablemente la decisión sería no implantar ningún proyecto de mitigación.

Si por el contrario la probabilidad de ocurrencia y severidad son altas con un coste de eliminación bajo asociado, sin duda este proyecto debiera ser implementado con urgencia.

A estos dos atributos (ocurrencia y severidad) los autores suman un tercero que es el factor de detección (definida como la probabilidad de detectar la causa antes de que el fallo ocurra) bajo la premisa, al menos teórica, que un fallo “detectable” a priori puede ser resuelto “*ex ante*” sin que genere “daños” (o sean más pequeños) mientras que uno “no detectable” solo puede repararse mediante acciones correctivas “*ex post*” una vez que el daño se ha generado.

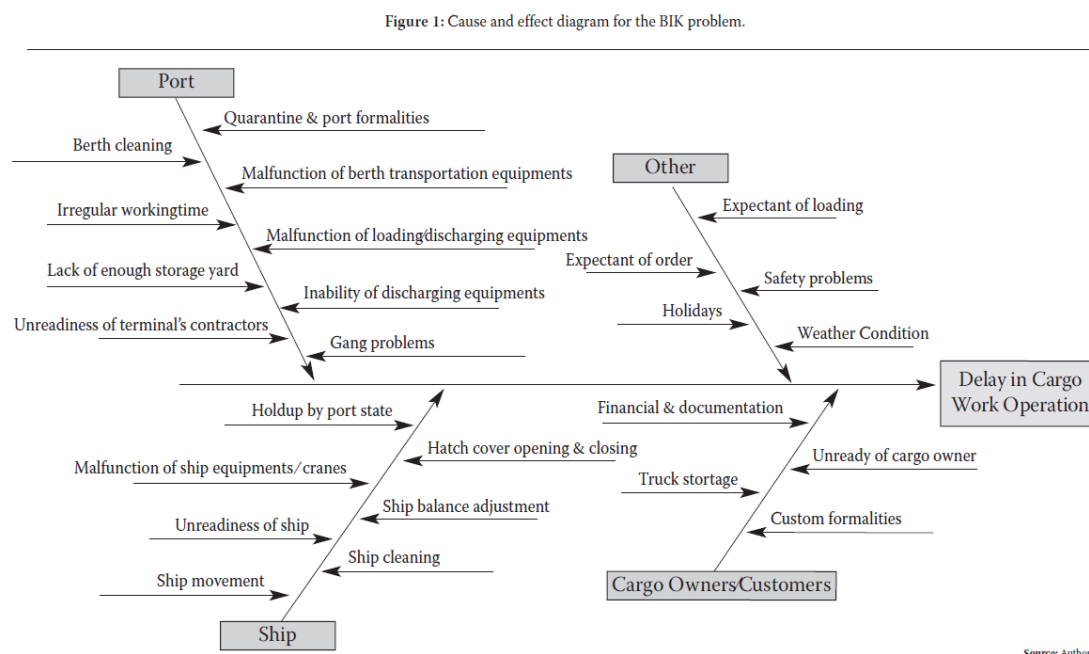
Como base experimental los autores trabajan sobre la mayor terminal de graneles de Irán (la *Dry Bulk Imam Khomeini Terminal* o “BIK”) sobre la que construyen el diagrama de causa-efecto que

²⁹⁸ Estas técnicas fueron introducidas probablemente a finales de los años 40 en el campo militar por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en USDD (1949) y trasladados posteriormente al mundo civil en aplicaciones como la técnica aeroespacial donde han tenido mucho éxito (implantación en el programa Apolo de la NASA en los años 60, véase NASA (1966)) o industria del automóvil (implantación en FORD en los años 70 tras el fracaso que supuso el conocido caso “*Ford Pinto*” que llevaba a que una carrocería endeble hacía que en caso de colisión las puertas quedasen bloqueadas con los conductores dentro hecho que se agravaba con un diseño de un depósito del combustible detrás del eje trasero que le hacía explotar con facilidad en caso de colisión.

²⁹⁹ Los sistemas FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) y su extensión FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) son desarrollados en NASA (1995) y USDD (1949).

se muestra en la ilustración 189 y en la que para cada componente del sistema (que definen como puerto, barco, clientes y “otros”) definen posibles causas que pueden derivar en el retraso de la operación bien por pausa o bien por la ralentización de la misma.

Ilustración 189. Diagrama de Causa – Efecto en la terminal de graneles BIK de Irán.



Fuente: Sayareh y Ahouei (2013).

En base a datos reales (que compilan en una tabla que se reproduce íntegramente en la tabla 23) calculan para cada modo de fallo detectado en el diagrama anterior la frecuencia (número de veces que se presenta ese modo de fallo) y su severidad (medida en términos de la duración media del retraso y la pérdida total de tiempo por dicha causa).

Utilizando una segmentación tipo Pareto llegaron a la conclusión que más del 76% de los modos de fallo estaban asociados a causas asociadas al puerto o al cliente (los definen como “*unfitness of port*” y “*unfitness of cargo owner*” en la ilustración 190).

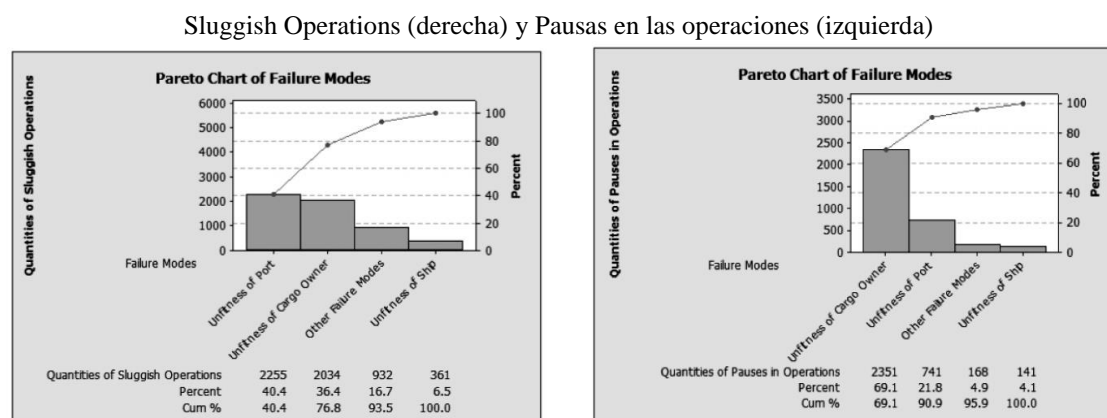
El caso de operaciones anormalmente lentas (que definen como “*sluggish operations*” en la gráfica izquierda de la ilustración 190) el principal causante era el puerto mientras que en el caso de interrupciones o pausa en las operaciones (“*pauses in operations*” en la gráfica derecha de ilustración 190) el principal causante era el propietario de la carga.

Tabla 23. Cuantificación de la ocurrencia y severidad de las causas de fallos en la terminal de graneles BIK de Irán.

Failure	Effect of Failure	Cause of Failure	Tot.	Ave.	N
Unfitness of Ship	Pauses in Operations	Malfunction of ship's equipment	20.5	20.5	1
		Unreadiness of ship	24	24	1
		Holdup by Port State	85.5	14.25	6
		Ship cleaning	11.5	11.5	1
	Sluggish Operations	Malfunction of ship's equipment	231.75	5.4	43
		Unreadiness of ship	2	2	1
		Ship movement	32	6.4	5
		Ship balance adjustment	35	3.18	11
Unfitness of Port	Pauses in Operations	Hatch cover opening and closing	60	7.5	8
		Malfunction of loading and discharging equipment	48	24	2
		Movement of equipment	15	15	1
		Lack of enough storage yard	72	72	1
	Sluggish Operations	Unreadiness of terminal's contractor	24	24	1
		Quarantine and port formalities	582	4.73	123
		Malfunction of berth transportation equipment	241.5	3.05	79
		Malfunction of loading and discharging equipment	279	3.2	87
		Movement of equipment	20.5	0.89	23
		Inability of discharging equipment	121	2.47	49
		Berth cleaning	211.5	2.9	73
		Lack of enough storage yard	270.5	8.19	33
		Irregular working time	128	1.77	72
		Unreadiness of terminal's contractor	86.75	1.93	45
		Gang Problems	321.5	2.61	123
		Quarantine and port formalities	526	3.55	148
		Others	49	1.96	25
Unfitness of Cargo Owner	Pauses in Operations	Financial and documentation problems	1276	60.76	21
		Unreadiness of cargo owner	1064	11.44	93
		Custom formalities	11	11	1
	Sluggish Operations	Financial and documentation problems	690.5	14.09	49
		Unreadiness of cargo owner	628.5	5.56	113
		Truck shortage	662.5	12.74	52
Other Failure Modes	Pauses in Operations	Others	53	6.62	8
		Weather condition	120	24	5
		Expectant of order	24	24	1
	Sluggish Operations	Expectant of loading	24	24	1
		Weather condition	702.5	11	64
		Holidays	96	24	4
		Safety problems	44.5	11.12	4
		Others	89	6.36	14

Fuente: Sayareh y Ahouei (2013).

Ilustración 190. Ejemplo de análisis de Pareto para analizar las causas de los retrasos en las operaciones en la terminal de graneles BIK de Irán.



Fuente: Sayareh y Ahouei (2013).

Con los datos de la tabla 23 calculan en una escala de 1 a 10 y para cada causa de retraso: 1) la severidad (medida en función de la duración del retraso siendo 10 en el caso de retrasos muy severos o de más de 24 horas y retrasos pocos significativos aquellos de menos de 2 horas); 2) la probabilidad de ocurrencia (con 10 puntos o alta probabilidad aquel que se presenta más de 36 veces y muy bajo cuando está por debajo de 1.5 veces³⁰⁰); y, 3) el criterio de detección previa (con puntuación de 10 las extremadamente improbables de detectar, es decir, cuando con toda certeza el operador no será capaz de determinar el fallo con antelación y de 1 cuando existen procedimientos que llevan a que toda probabilidad de que el operador sea capaz de conocer previamente el problema). Detalles de las escalas se representan en la tabla 24.

³⁰⁰ Aunque en la tabla se refieren los datos de esta sección en tanto por ciento, se entiende por el texto que se trata de una errata y en realidad los autores utilizan el número de eventos para esta clasificación y no su %.

Tabla 24. Tablas de normalización de ocurrencia, severidad y probabilidad de detección prematura de fallos en una terminal de graneles sólidos.

Criterio de evaluación de severidad			Criterio de evaluación de probabilidad de detección		
Rank	Effect	Criteria: severity of effect on process	Rank	Effect	Criteria: severity of effect on process
10	Very Long delay	Period of stop is often more than 24 hours	10	Extremely unlikely	Controls will almost certainly not able to detect the existence of a defect
9	Long delay	Period of stop is often less than 24 hours and more than 12 hours	9	Remote likelihood	Defect is detectable after operation & port operators won't be able to correct it
8	Moderate delay	Period of stop is often less than 12 hours and more than 6 hours	8	Very low likelihood	Port operators will be able to correct the defect with limitations after operation
7	Moderate delay	Period of stop is often less than 6 hours or period of sluggish operation is more than 18 hours	7	Low likelihood	Port operators will be able to correct the defect after operation
6	Moderate delay	Period of sluggish operation is often less than 18 hours and more than 12 hours	6	Moderate low likelihood	Port operators will be able to correct the defect during operation
5	Minor delay	Period of sluggish operation is often less than 12 hours and more than 6 hours	5	Medium likelihood	Controls have medium effectiveness for detection
4	Minor delay	Period of sluggish operation is often less than 6 hours and more than 3 hours	4	Moderate high likelihood	Defect is detectable prior operation
3	Slight delay	Period of sluggish operation is often less than 3 hours and more than 2 hours	3	High likelihood	Controls have high effectiveness for detection prior operation
2	Slight delay	Period of sluggish operation is often less than 2 hours	2	Very high	Controls have a very high probability of detecting the existence of delay prior operation
1	No delay	There is no stop or sluggish operation	1	Extremely likely	Controls will almost certainly detect the existence of the defect and correct it

Criterio de evaluación de ocurrencia		
Rank	Likelihood of failure	Criteria: occurrence of causes – incidents per items
10	Very high High	> 36%
9		30 - 36%
8		24- 30%
7		18- 24%
6	Moderate	12 - 18%
5		6 - 12%
4		3 - 6%
3	Low	1.5 - 3%
2		< 1.5%
1	Very low	Failure is eliminated through preventive control

Fuente: Sayareh y Ahouei (2013).

Con ello el sistema RPN es aplicado multiplicando para cada causa de fallo la puntuación de severidad, por la de ocurrencia de este evento y por la de probabilidad de detección futura, siendo acciones prioritarias la de más alta puntuación. Idealmente, una causa de fallo con puntuación 1000 sería la que lleva a retrasos de más de 24 horas, que se presenta más de 36 veces y que en ningún caso podría ser detectada con antelación.

En la ilustración 191 se muestran de manera gráfica los resultados obtenidos.

Ilustración 191. Análisis RPN (Risk Priority Numbers) en la Dry Bulk Imam Khomeini Terminal (Irán).

Line	Component and Functions	Failure Mode	Effect(s) of Failure	Severity	Cause(s) of Failure	Occurrence	Current Controls, Detection	Detection	RPN
1	Cargo Owner; delivers or receives cargo to/from port	Unfitness of Cargo Owner to deliver or receive cargo from/to port	Pause of cargo work operation	10	Financial and documentation problems	5	None	10	500
2				8	Unreadiness of cargo owner	8	None	10	640
3			Sluggish cargo work operation	6	Financial and documentation problems	6	None	10	360
4				4	Unreadiness of cargo owner	9	None	10	540
5				6	Truck shortage	6	None	10	360
6	Port; transfers cargo from berth to ship or vice versa	Unfitness of Port to deliver or receive cargo from/to port	Pause of cargo work operation	7	Quarantine and port formalities	10	Coordination between responsible organisations by port authority	8	560
7			Sluggish cargo work operation	4	Malfunction of berth transportation equipment	7	Implementation of PM and CM programs	3	84
8				4	Malfunction of loading and discharging equipment	8	Implementation of PM and CM programs	3	96
9				3	Inability of discharging equipment	6	None	9	162
10				3	Berth cleaning	7	None	8	168
11				5	Lack of enough storage yard	5	Control by warehouse employees	6	150
12				2	Irregular working time	7	Check by operational section (visual)	7	98
13				2	Unreadiness of terminal's contractor	6	Check by statistical process control (SPC)	5	60
14				3	Gang Problems	10	Supervision	6	180
15				4	Quarantine and port formalities	10	Coordination between responsible organisations by port authority	8	320
16	Ship; carries cargo from/to port	Unfitness of ship	Pause of cargo work operation	9	Holdup by Port State	3	Port state	3	81
17			Sluggish cargo work operation	4	Malfunction of ship's equipment	6	None	6	144
18				4	Ship balance adjustment	4	None	6	96
19				5	Hatch cover opening and closing	3	None	7	105
20	Others	Cargo work operation is impossible	Pause of cargo work operation	10	Weather condition	3	Weather forecasting organisation	3	90
21			Sluggish cargo work operation	5	Weather condition	7	Weather forecasting organisation	3	105
22				10	Holidays	2	Annual holiday at calendar	3	50

Fuente: Sayareh y Ahouei (2013).

Este último trabajo no es propiamente un ejercicio de simulación (como los que se han estado repasando) en tanto que en la formulación del problema se obtienen datos reales o eventos pasados y conocidos y no se aplica ningún modelo de simulación al análisis. Sin embargo, se cita por ser

una fuente de inspiración para futuros trabajos en este campo si se combinan adecuadamente las técnicas de simulación y modelización con las FMEA.

Así por ejemplo, si a través de técnicas de escenarios de simulación se evalúan mediante un modelo ciertos indicadores de rendimiento de la terminal o de sus agentes (maquinaria, grúas, buques, etc...) y con ellos se calculan la probabilidad de ocurrencia y severidad de determinados fallos (midiendo por ejemplo longitud o duración de las colas) podrían combinarse ambas técnicas proporcionando a los operadores portuarios un criterio más de selección de estrategias de inversión u operación, basándose en técnicas de valoración objetivas.

Volviendo al recorrido secuencial, Kaptein (2013) enumera las constricciones a las que se ven sometidas las terminales de graneles sólidos y justifica la utilización de modelización.

En primera instancia resalta la complejidad de las relaciones y las capacidades limitadas de los tradicionales sistemas de evaluación analíticos (basados en hojas de cálculo más o menos complejas) para, en segundo lugar, señalar la posibilidad de implementar herramientas de visualización y animación.

Este autor analiza las posibilidades de la herramienta Flexterm© (anteriormente conocida como FlexSim C ©) describiendo sus funcionalidades y presentando un caso práctico de terminal ferroviaria dentro de una terminal portuaria de carbón y en la que evalúa 11 escenarios sobre diferentes configuraciones de medios de manipulación y llegada de trenes al sistema (que define de una manera determinista o fija en intervalos de 8-12 horas, y 2-4 horas) calculando parámetros como la capacidad máxima de la terminal (número máximo de trenes atendidos), grado de utilización del equipamiento, etc.

Por su lado Nikolay (2014) realiza un breve análisis de terminales de graneles y de las herramientas comerciales disponibles para abordar la simulación destacando Anylogic, Arena, Enterprise Dynamics y Flexim. Es un estudio de corte teórico y no desarrolla ningún modelo ni lo aplica a ningún experimento real concreto.

Por otro lado, en su tesis doctoral, van Vianen (2014) presenta un modelo integrado para el diseño de terminales de graneles sólidos, particularizando dentro de su trabajo los casos concretos de terminales de carbón y mineral de hierro. Se trata de un texto muy completo y que conviene destacar tanto por su claridad como por la utilización de algunos elementos novedosos que ya habían sido introducidos en Bugaric *et al.* (2011).

Efectivamente, se destaca esta contribución no sólo porque presenta su modelo de una manera muy completa, sino porque dedica unos capítulos introductorios a describir de una manera muy didáctica el funcionamiento de este tipo de terminales y la maquinaria con la que están dotados por lo que resulta una lectura muy interesante para comprender el funcionamiento de este tipo de

terminales y denota que es un buen ejemplo en el que el modelador sabe incorporar en su modelo el funcionamiento real de la terminal. En concreto este autor aborda:

- La modelización del lado marítimo y diseño de las obras de amarre / muelles (SMQLD³⁰¹), describiendo tanto la maquinaria (cargadores y descargadores) como los principales problemas de simulación en esta parte de la terminal: asignación de atraque (BAP³⁰²), asignación de grúa de muelle (QCAP³⁰³), y programación de grúas de muelle (QCSP³⁰⁴) recopilando, por último, las diferentes aproximaciones utilizadas.
- La modelización de la operación lado tierra (incluyendo, tanto el transporte horizontal dentro de la terminal con cintas u otros medios, como la entrada/ salida de material de la terminal por ferrocarril y carretera mediante camiones).
- La modelización del propio almacenamiento (inventario y estrategias de almacenamiento y mezclado de materiales) con su maquinaria asociada (apiladoras, *stackers*, *reclaimers*,...).

Este autor, tanto para las operaciones marítimas como para las terrestres, analiza antes de entrar en el modelo las distribuciones más adecuadas de llegadas de buques y de servicio de los mismos. Para ello presenta un cuadro resumen de las distribuciones tomadas por otros autores. En la tabla 25 y hasta la tabla 28 se presentan las referencias analizadas en sus estudios donde “C” significa que el autor mencionado ha estudiado el caso de terminales de contenedores, mientras que “DB” (acrónimo de “*Dry Bulk Terminal*”) significa terminal de graneles sólidos. La notación “NED” (acrónimo de “*negative exponential distribution*”) es igual a una distribución exponencial o markoviana (función Erlang de fase 1).

³⁰¹ *Seaside Modelling and Quay Layout Design.*

³⁰² *Berth Allocation Problem.*

³⁰³ *Quay Crane Allocation Problem.*

³⁰⁴ *Quay Crane Scheduling Problem.*

Tabla 25. Funciones de distribución de llegada de buques en distintas terminales conforme diferentes autores.

IATDist	Reference	n_s [-]	Cargo ¹	IAT Dist	Reference	n_s [-]	Cargo ¹
Weibull	Tengku-Adnan et al. (2009)	408	DB	NED	Kia et al. (2002)	372	C
	Tahar and Hussain (2000)	-	C		Demirci (2003)	297	C
Erlang-2	UNCTAD (1985)	-	DB		Pachakis and Kiremidjian (2003)	142	C
Erlang-k	Kuo et al. (2006) ²	7,729	C		Van Asperen et al. (2003)	-	LB
NED	UNCTAD (1985)	-	DB		Dragovic et al. (2006)	711	C
	Radmilovich (1992)	-	-		Bugaric and Petrovic (2007)	-	DB
	Kozan (1997)	679	C		Legato and Mazza (2013)	1030	C
	Shabayek and Yeung (2002)	12,610	C				

Fuente: van Vianen (2014).

Tabla 26. Ajustes de distribución de llegada de buques.

Terminal	Figure	Characteristics	\dot{m} [Mt/y]	n_s [-]	Best fitted distribution	χ^2 [-]	$\chi^2_{0.05}$ [-]
T1	3.8A	Single-user import	18	345	Weibull / Erlang-2	41.6 / 76.7	33.9
T2	3.8B	Multi-user import	37	898	NED	25.6	32.7
T3	3.9A	Single-user export	44	186	Weibull / Normal	43.4 / 60.1	27.6
T4	3.9B	Multi-user import	16	115	Weibull	30.1	30.1
T5	3.10	Multi-user import	12	202	Erlang-2	26.9	30.1

Fuente: van Vianen (2014).

Tabla 27. Funciones de distribución de tiempos de servicio de buques en diferentes terminales según diferentes autores.

W _s Dist	Reference	n _s [-]	Cargo ¹	W _s Dist	Reference	n _s [-]	Cargo ¹
Normal	Tahar and Hussain (2000)	150	C	Erlang-k	Shabayek and Yeung (2002) [k:117]	12,610	C
	Bugaric and Petrovic (2007)	-	DB		Kozan (1997) [k:4]	679	C
NED	Radmilovich (1992)	-	-		Kia et al. (2002) [k:4]	372	C
	Demirci (2003)	297	C		Altiok (2000) [k:4]	248	DB
Beta	Legato and Mazza (2013)	1,030	C		Dragovic et al. (2006) [k: 3,7,12]	711	C
Gamma	Jagerman and Altiok (2003)	304	DB		UNCTAD (1985) [k:2]	-	DB

Fuente: van Vianen (2014).

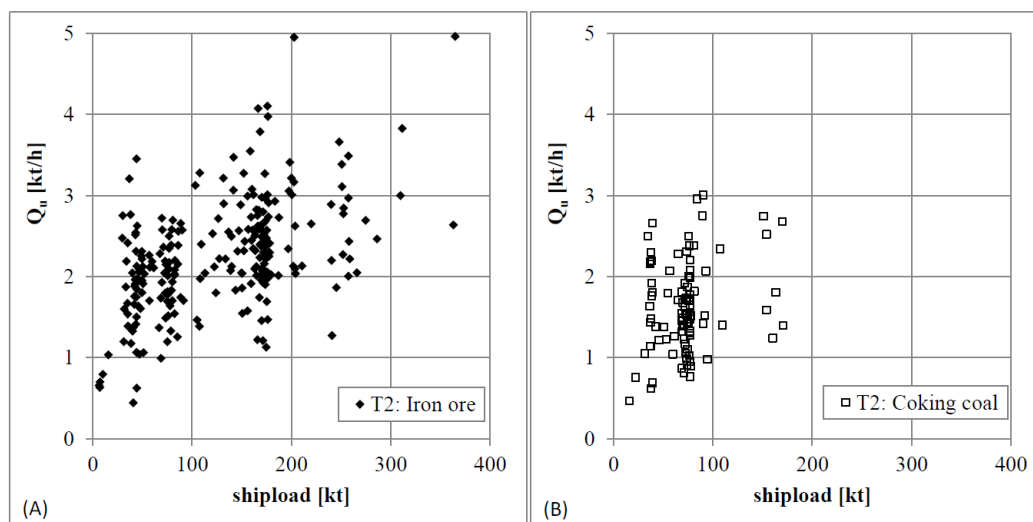
Tabla 28. Ajustes de distribución de tiempo de servicios de buques.

Terminal	Figure	Best fitted distribution	χ^2 [-]	$\chi^2_{0.05}$ [-]	W _s [h]	Shipload [kt]
T2	3.11A	Erlang-2	259.4	36.4	55	103
T4	3.11B	Erlang-2	48.6	27.6	94	69
T5	3.12	Erlang-2	15.9	19.7	39	24

Fuente: van Vianen (2014).

Este autor también hace un interesante estudio de dispersión para conocer la relación entre el tamaño del buque y los rendimientos medios de operación, llegando a la conclusión de que cuanto mayor es el buque, mayores rendimientos se obtienen. Ejemplo de los resultados se presentan en la ilustración 192.

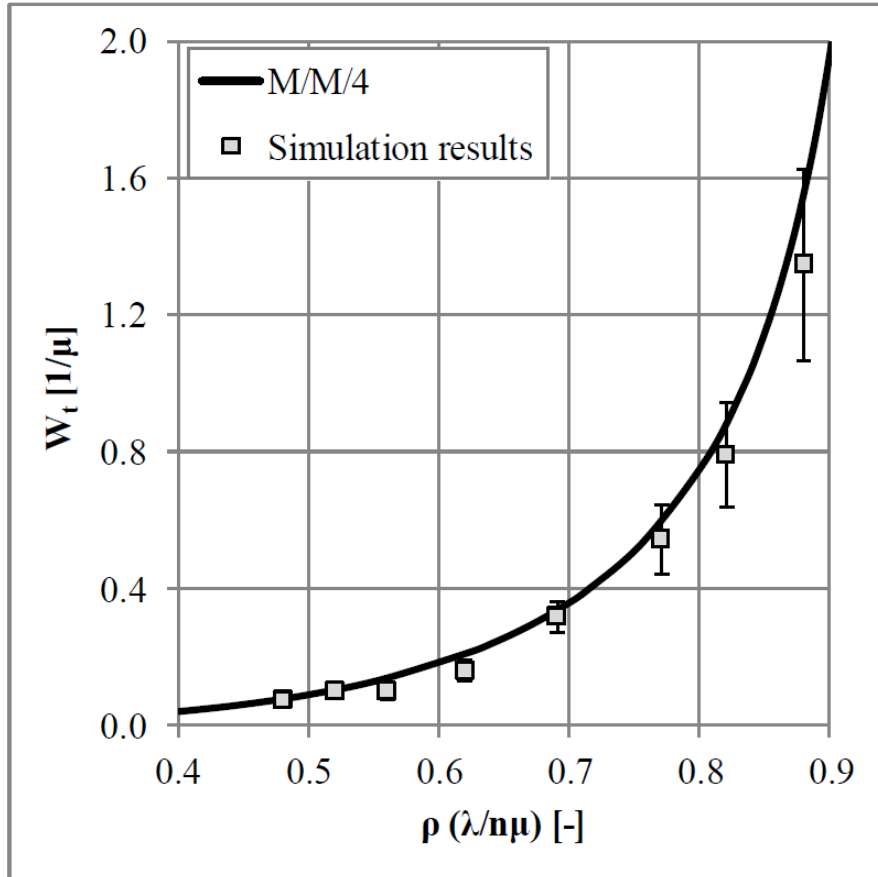
Ilustración 192. Relación entre los ratios de descarga Q_s (Kton/hora) y el tamaño de los barcos (shipload) (Kton).



Fuente: van Vianen (2014).

Así mismo, también realiza una comparación entre el modelo de simulación que desarrolla y los resultados que se obtiene por procedimientos analíticos con una formulación de teoría de colas clásica (este autor ajusta a 4 atraques con formulación M/M/4 es decir con distribuciones exponenciales tanto en tiempo entre-llegada de buques como tiempo de servicio), siendo uno de los pocos ejemplos en la literatura científica donde estas comparaciones entre procedimientos analíticos y de simulación se presentan de manera explícita. Como ejemplo se presenta la ilustración 193.

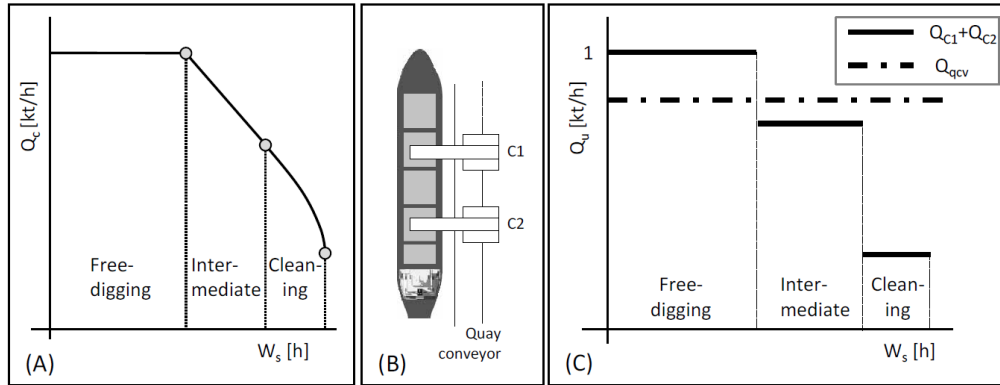
Ilustración 193. Comparación entre resultados de modelo y teoría de colas aplicando un sistema M/M/4 en una terminal de graneles sólidos.



Fuente: van Vianen (2014).

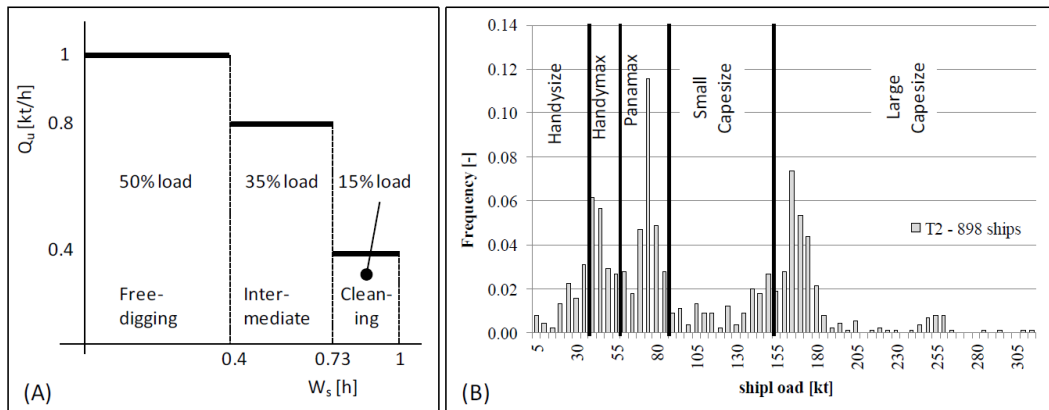
Una de las contribuciones más relevantes de este autor reside en lo que se refiere a la consideración del tiempo de servicio de los buques. En concreto, no utiliza en su modelo un parámetro determinista (ratio de descarga fijo en base a datos medios reales) o una aproximación estocástica (mediante una distribución clásica exponencial o Erlang fase K en tiempos de servicio) sino que introduce unos ratios de descarga variables en el tiempo adoptando la curva que ya había anunciado Verschoof (2002) según el cual la descarga avanza a un ratio del 100% de capacidad del descargador con bodegas llenas al inicio de la descarga (*free-digging phase*), para bajar a una media del 80% en fase intermedia y a un 40% en la fase final de limpieza de bodegas (ilustración 194 e Ilustración 195).

Ilustración 194. Determinación de la capacidad de descarga.



Fuente: van Vianen (2014).

Ilustración 195. Eficiencia de las grúas en la descarga (A) y distribución de tipo de buques (B) basado en datos históricos de una terminal Fuente: van Vianen (2014).



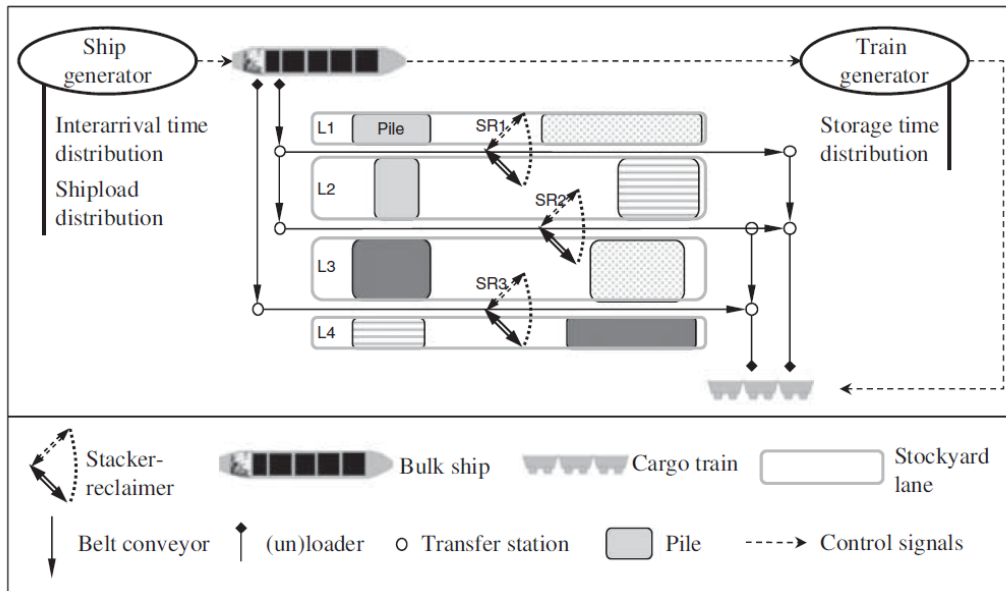
Fuente: van Vianen (2014).

Los estudios incluidos en la tesis de van Vianen, serán continuados en una aplicación práctica que implementan van Vianen *et al.* (2015) para el diseño de la red de cintas transportadoras de una terminal de importación de graneles sólidos afectados por la variación de naturaleza estocástica de la llegada de buques, los ritmos de descarga de los mismos y la disponibilidad del equipamiento portuario.

En este estudio, también, se consideran la política de almacenamiento y distintas configuraciones de una red de cintas. Los autores llegan a la conclusión que, al menos en el experimento que estudian, una mayor conexión de cintas no lleva necesariamente a una mejora de los rendimientos siendo más efectiva una redundancia en las máquinas de apilado que alimentan una pila (que haya dos capaces de alimentar dicho almacenamiento) (ilustración 196).

Como habían hecho estos autores en sus trabajos anteriores utilizan como herramienta de simulación “Tomas”, desarrollo de Delft University (Delft, Holanda) sobre Delphi del que ya se ha hablado.

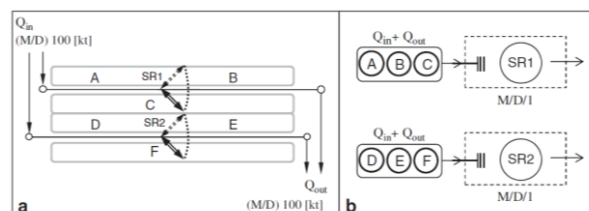
Ilustración 196. Representación esquemática de una terminal de importación de graneles operada mediante cintas.



Fuente: van Vianen *et al.* (2015).

Como elemento de valor de este último trabajo, van Vianen *et al.* (2015) contrastan los resultados de su modelo con los que se obtendrían mediante la aplicación de teoría de colas. Para ello consideran un caso simple compuesto por dos líneas de apilado sobre la que operan sendos *stacker-reclaimer* (“SR”) alimentados por una llegada aleatoria de barcos (distribución exponencial negativa) y que operan a ritmo constante (tiempo de servicio determinista). En el modelo de estos autores, cada pila es representada por una cola del tipo M/D/1 en notación Kendall (Kendall, 1953), estando el sistema formado por dos colas independientes. Los resultados validaron el modelo que ajustaba bien al procedimiento analítico aportando éste unos mayores valores del tiempo medio de espera de (W_t) de los SR (ilustración 197 e ilustración 198).

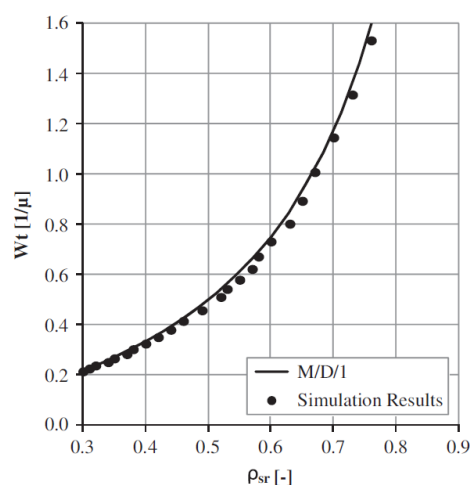
Ilustración 197. Representación simplificada de un modelo de dos colas M/D/1 en las pilas de una terminal de granel sólido.



Fuente: van Vianen (2015).

Ilustración 198. Comparación entre los resultados de simulación y analíticos (cola M/D1) obtenido en el modelo de van Vianen (2015) para dimensionamiento de un sistema de cintas de una terminal de granel sólido.

En la gráfica W_t es el tiempo medio de espera y ρ_{sr} es el coeficiente de utilización del stacker-reclaimer.



Fuente: van Vianen (2015).

4.2.5 Resumen de trabajos por año de publicación, temática y herramienta.

En la tabla 29 se presenta un resumen de todos los estudios revisados con indicación (si existe dicha información) no sólo del autor y año; sino de la clase de terminal sometida a estudio, tipo de problema resuelto; diseño experimental concreto y lenguaje de programación, simulador o técnica de programación utilizada.

En total se han analizado 59 artículos que se agrupan en 41 grupos pues, como se ha indicado, existen artículos que en realidad representan el mismo modelo que ha sido presentado en diferentes foros o del que se presentan sucesivas ampliaciones o mejoras en otros artículos posteriores. Para seguir un orden cronológico se cita siempre el primero de la serie.

Tabla 29. Estudios de modelización en terminales de graneles sólidos.

	Autor / Autores	Terminal	Problema Resuelto / Diseño Experimental	Lenguaje/ Simulador
1.	Steer y Page (1961),	Terminal de Importación de mineral de hierro.	Gestión completa de una terminal de graneles sólidos.	Montecarlo.
2.	Beattie <i>et al.</i> (1970 y 1971),	Terminal de Importación de mineral de hierro.	Gestión completa de una terminal de graneles sólidos en el Reino Unido de <i>British Steel Corporation</i> .	Sin datos disponibles sobre lenguaje / software utilizado.
3.	Baunach <i>et al.</i> (1985)	Terminal de transbordo de carbón	Terminal de Transbordo de carbón en Batam Island (Indonesia). Diseño de la terminal (configuración de ataques y equipamiento) y cálculo de su capacidad anual.	Utilización de modelo DES. Sin datos disponibles sobre lenguaje / software utilizado.
4.	El Sheikh <i>et al.</i> (1987)	Terminal de graneles incluido dentro de un proyecto de ampliación portuaria.	Estudio del número de atraques necesarios en las obras de ampliación de un Puerto de un país en vía de desarrollo (sin especificar).	PASCAL utilizando algoritmos del tipo ACD ("activity diagram cycle").
5.	Park y Noh (1987a y 1987b),	Terminal de importación de carbón.	Gestión completa de la McDuffie Coal Terminal de Mobile (Alabama, Estados Unidos).	SLAM y generación de escenarios Montecarlo.
6.	Guimaraes y Kingsman (1989)	Terminal de grano.	Gestión completa de la terminal de grano de Lixoes (Portugal).	FORTTRAN.
7.	Wadhwa (1992),	Terminal de graneles sólidos.	Gestión global / Simulación y Optimización de un conjunto de puertos en Australia.	Pascal.
8.	Sánchez y Sampedro (1993) y Sánchez <i>et al.</i> (2005)	Terminal de importación de carbón.	Evaluación estrategias de inversión en infraestructura portuaria (número optimo y tamaño de atraques) teniendo en consideración las necesidades de suministro y de almacenamiento de producto en un horizonte de largo plazo (50 años).	Sin datos disponibles sobre lenguaje / software utilizado.
9.	King <i>et al.</i> (1993)	Terminal de importación de carbón	Estudios de planificación y resolución de cuellos de botella en una terminal de graneles que alimenta una central térmica en China.	Sin datos disponibles sobre lenguaje / software utilizado.

	Autor / Autores	Terminal	Problema Resuelto / Diseño Experimental	Lenguaje/ Simulador
10.	Kao <i>et al.</i> (1993) continuado en Hsu y Chen (1997), Shih (1997) y Liu y Sherali (2000)	Cadena global de la cadena logística de carbón / Terminal de carbón.	Modelo cubriendo la cadena de suministro completa desde la compra en origen (varios puntos) hasta los puntos de consumo final (varias centrales eléctricas) para la utility <i>Taiwan Power Company</i> en Taiwan. Resolución del problema de inventario y programación de precios (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) con introducción del precio como elemento de decisión.	MIP con algoritmo tipo <i>branch-and-bound</i> (no especifican lenguaje o software utilizado).
11.	Bhasi y Acharya (1997) continuado en Bhasi (2004), Jagathy <i>et al.</i> (2001) y Jagathy y Acharya (2007)	Terminal de graneles sólidos (descarga) y retorno de producto terminado (carga).	Diseño de flota (número y tipo de barcas + Localización de la terminal + Repercusión de escenarios de inversión (repercusión en coste unitario de obras de dragado) que da servicio a una industria de acero.	Modelo DES. Finalmente el modelo acaba implementándose como un DSS dentro de las operaciones de la compañía (no especifican lenguaje o software utilizado).
12.	Weiss <i>et al.</i> (1999)	Terminal de carbón.	Diseño de una terminal de recepción, almacenamiento, mezcla y carga de carbones.	Técnicas de simulación DES. Sin datos disponibles del software utilizado.
13.	Jin <i>et al.</i> (1999)	Terminal de graneles sólidos (tipo de terminal no disponible).	Diseño óptimo de un sistema logístico-portuario asociado a una terminal de granel. Objetivo múltiple: optimización de los resultados económicos de la terminal - la maximización de disponibilidad de instalaciones. Aplican diseño experimental para contrastar resultados (no disponible la localización).	Técnicas de simulación DES y aplicando técnicas de resolución tipo Fuzzy.
14.	Wadhwa (2000),	Terminal de graneles sólidos.	Simulación / Optimización de Puertos en Australia.	Arena©.

	Autor / Autores	Terminal	Problema Resuelto / Diseño Experimental	Lenguaje/ Simulador
15.	Bugaric y Petrovic (2002), Bugaric y Petrovic (2007), Bugaric <i>et al.</i> (2011) y Bugaric <i>et al.</i> (2012).	Terminal fluvial de graneles sólidos (carbón, mineral de hierro y caliza).	Combinación de BAP con QCAP para investigar diversas estrategias de operación (fórmulas de colaboración de las grúas) en diferentes escenarios de inversión (incremento de número de grúas). Escenario experimental en puerto fluvial del Danubio.	PASCAL. Modelo de tres colas (cola 1: admisión del buque a la zona de fondeo; cola 2: admisión del buque al atraque y cola 3: asignación de grúas).
16.	Dahal <i>et al.</i> (2003) y Dahal <i>et al.</i> (2007),	Terminal de carbón y mineral de hierro.	Gestión integral de la operación de una terminal de graneles sólidos equipada con cargadores, descargadores y sistemas de cinta hasta zona de almacenamiento.	Portmodel© (Aplicación de algoritmos genéticos).
17.	Demirci (2003)	Puerto multi-propósito con varios atraques y tipo de tráfico (carbón, ro-ro, mercancía general)	Operativa portuaria global. Puerto de Trabzon (Turquía). Selección de las mejores estrategias de inversión (sobre la base de investigar cuellos de botella en condiciones de operación bajo congestión o a máxima capacidad)	Awesim ©.
18.	Lu <i>et al.</i> (2005).	Terminal de mineral de hierro.	Optimización del coste global de la cadena logística de una terminal de hierro en la que operan varios suministradores y varios consumidores.	No disponible.
19.	Ottjes <i>et al.</i> (2007).	Terminal de mineral de hierro.	Mejora del control operacional de una terminal de graneles con dimensionamiento de la configuración de las pilas de almacenamiento	Delphi (Tomas).
20.	Harris <i>et al.</i> (2008).	Terminal de carbón.	Operativa completa de la terminal de carbón <i>McDuffie Coal Terminal</i> en Alabama (Estados Unidos) utilizando técnicas de <i>lean manufacturing</i> .	ProcessModel.
21.	Lodewijks <i>et al.</i> (2009).	Terminal de mineral de hierro.	Diseño de un sistema de cintas de descarga en una terminal de mineral de hierro en el puerto de Chinnai (India)	Delphi (Tomas).
22.	Boschert y Hellmuth (2010).	Terminal de graneles sólidos asociado a una factoría de acero.	Diseño / Optimización del sistema de cintas.	Modelo <i>ad hoc</i> desarrollado por Siemens AG (software denominado ' <i>Simulation Tool for Conveying Systems</i> ').

	Autor / Autores	Terminal	Problema Resuelto / Diseño Experimental	Lenguaje/ Simulador
23.	Dong y Liu (2009)	Terminal de importación de carbón de hierro.	Modelización / Simulación del funcionamiento global de la terminal.	Modelo DES construido sobre VC++.
24.	Roy y Bandyopadhyay (2010) .	Terminal de descarga de graneles sólidos.	Aproximación de tipo estocástico con funciones de coste modelizando la gestión integral de la terminal. Aplicación al puerto de Calcuta (India).	Sin datos disponibles sobre lenguaje / software utilizado.
25.	Laih y Sun (2010).	Terminal de graneles sometido a congestión (datos de la terminal no disponible).	Análisis de un esquema tarifario en una terminal de graneles sometida a congestión y compasión de tiempos de espera de una terminal sometida a un esquema tarifario variable y otra que no lo está.	Modelo basado en teoría de colas.
26.	Cigolini y Rossi (2010) continuado en Cigolini <i>et al.</i> (2011) y Cigolini <i>et al.</i> (2013).	Transbordo de graneles sólidos (carbón) off-shore y posterior transporte y descarga en terminal fluvial.	Diseño de flota de barcasas (número y capacidad) y grúas de transbordo (número y capacidad) en terminal flotante de transbordo.	Utilización de redes de Petri. Utilización de lenguaje Visual Basic y bibliotecas <i>ad hoc</i> basadas en ARENA®.
27.	Wang <i>et al.</i> (2011).	Terminal de carga y descarga de carbones (graneles sólidos).	<i>Berth Scheduling Problem</i> o "BSP" (Programación de medios de carga y descarga).	Tecnología Web Services en un DSS (Utilización de algoritmo tipo <i>fuzzy</i> dinámico para aplicar un método <i>Multi-stage Decision</i>).
28.	Umang <i>et al.</i> (2011).	Terminal de granel sólido en general sin especificar la tipología pero indicando que el mismo se opera con cintas.	Resolución del BAP en terminales de graneles sólidos. Para contrastar los resultados del modelo con datos reales se aplica el mismo al puerto de Saqr en Ras Al Khaimah (Emiratos Árabes Unidos)	Desarrollo de un modelo DES basado en técnicas MIP Utilización del programa CPLEX 10.2 para testear los resultados del MIP.

	Autor / Autores	Terminal	Problema Resuelto / Diseño Experimental	Lenguaje/ Simulador
29.	Chen <i>et al.</i> (2011).	Dimensionamiento de la flota que atiende a un tráfico dedicado de mineral hierro.	Diseño de la flota de buques más efectivos (dimensiones y velocidad) que transportan mineral de hierro desde Tubarao (Brazil) a Beilun (China). El modelo de estos autores no sólo se utiliza para el dimensionamiento previo de la flota sino que se implementa en la futura operación de la misma y en la logística portuaria.	Técnicas de simulación mediante método Monte-Carlo con la ayuda del software <i>Crystal Ball</i> embebido en <i>Microsoft Solver</i> ©
30.	Cassettari <i>et al.</i> (2011).	Terminal de descarga de carbón de 3 millones de toneladas de capacidad.	Determinación de la capacidad de un cargador y área de almacenamiento de una terminal de graneles. Modelo de eventos discretos DES combinado con técnicas DOE (“ <i>Design of Experiments</i> ”) y RSM (“ <i>Response Surface Methodology</i> ”) en forma de un meta-modelo con la regresión existente entre distintas variables del modelo.	Flexsim 5.0.4 (modelo) y Design Expert 8.0 (RSM).
31.	Vieira <i>et al.</i> (2012).	Terminal poli-producto (mineral de hierro, café, soja, etc...).	BAP con constricciones de marea y stocks de producto (prioridades de asignación de atraque teniendo en cuenta ambos aspectos). Estos autores implementan el modelo en un puerto de Brasil sin indicar cuál es.	Modelo DES utilizando técnicas MIP implementado sobre el software comercial CPLEX y con la implantación de un algoritmo Greddy
32.	Mondragón <i>et al.</i> (2012).	Terminal de graneles sólidos.	Utilización de sistemas inteligentes de transporte (utilización de redes Wireless) en descarga de graneles.	OPNET.
33.	Van Vianen <i>et al.</i> (2012a).	Terminales de graneles sólidos (mineral de hierro y carbón).	Comparación de resultados analíticos mediante teoría de colas y modelos de simulación de distribuciones de tiempo de llegada de buques y tiempos de servicio de los mismos	Delphi (TOMAS).
34.	Van Vianen <i>et al.</i> (2012b) y Van Vianen <i>et al.</i> (2014b).	Terminales de graneles sólidos (mineral de hierro y carbón)	Modelización y optimización del área de almacenamiento de una terminal de graneles sólidos operado con cintas.	Delphi (TOMAS).

	Autor / Autores	Terminal	Problema Resuelto / Diseño Experimental	Lenguaje/ Simulador
35.	Van Vianen <i>et al.</i> (2012c) y van Vianen (2014).	Terminales de graneles sólidos (mineral de hierro y carbón).	DSS en relación al transporte interno de material en cintas. Diseños experimentales en la terminal EMO del puerto de Rotterdam	Delphi (TOMAS).
36.	Kaptein, R. (2013).	Terminal de graneles sólidos (sin especificar).	Funcionamiento de la terminal de intercambio modal ferroviaria dentro de una terminal de graneles sólidos.	FlexTerm©.
37.	Racero <i>et al.</i> (2013).	Terminal de grano.	Desarrollo conceptual del modelo de funcionamiento de la terminal de granos.	Modelo DES (desarrollo teórico).
38.	Sayareh y Ahouei (2013).	Terminales de graneles sólidos multi-producto.	Análisis de las causas de retrasos de las operaciones portuarias introducidas por cualquier agente (barco, puerto o propietario de la carga) y priorización de acciones de eliminación. Ejercicio experimental en la <i>Dry Bulk Imam Khomeini Terminal</i> (Irán).	Análisis de causas mediante FMEA (<i>Failure MOdel and Effects Analysis</i>) y priorización de acciones mediante sistemas RPN (<i>Risk Priorty Numbers</i>).
39.	Van Vianen <i>et al.</i> (2014a).	Terminales de graneles sólidos (mineral de hierro y carbón).	Modelización y optimización del <i>stacker-reclaimer</i> de una terminal de graneles sólidos operado con cintas.	Delphi (TOMAS).
40.	Nikolay (2014)	Terminal de granel sólido en genérico (sin especificar).	Estudio teórico con descripción de las herramientas comerciales disponibles, entre las que destaca: simulación destacando Anylogic©, Arena©, Enterprise Dynamics© y Flexim©. NO existe un experimento real concreto.	No desarrolla ningún modelo. Estudio de corte teórico.
41.	Van Vianen <i>et al.</i> (2015).	Terminales de graneles sólidos (mineral de hierro y carbón).	Modelización y optimización del sistema de cintas de una terminal de graneles sólidos operado con dichos elementos.	Delphi (TOMAS).

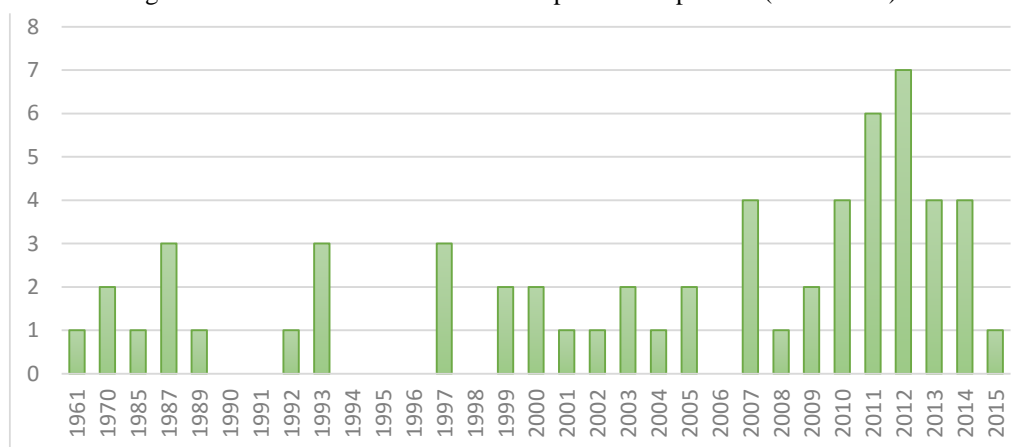
Fuente: Elaboración Propia.

4.2.6 Conclusiones y futuros campos de actividad en el campo de modelización de terminales de graneles sólidas.

A lo largo de la investigación en el marco de esta tesis doctoral se han localizado un total de 59 artículos que tratan mediante técnicas de simulación y optimización las terminales de graneles

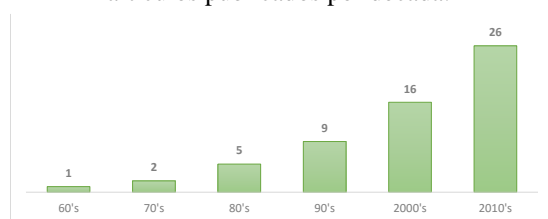
sólidos entre los años 1960 y 2015 (ilustración 199). Se ha constatado como el interés de la comunidad científica que resuelve problemas de investigación operativa en este campo de actividad es exponencialmente creciente en el tiempo. Efectivamente, si bien sólo uno de esos artículos corresponde a la década de los 60, dos (2) a la década de los 70 y cinco (5) en la de los 90, el número casi se duplica en los primeros años 2000 (16 artículos) y cuadruplica en la primera mitad de la presente década (solo en los cinco años contabilizados ya se han localizado 26 artículos científicos) (ilustración 200).

Ilustración 199. Evolución histórica de la cobertura científica al campo de modelización de terminales de graneles sólidos. Número de artículos publicados por año (1961-2015).



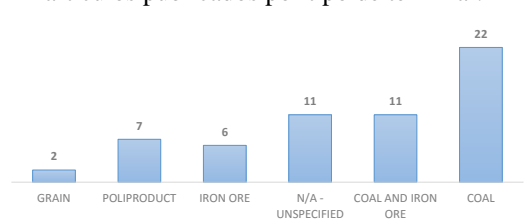
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 200. Evolución histórica de la cobertura científica al campo de modelización de terminales de graneles sólidos. Número de artículos publicados por década.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 201. Evolución histórica de la cobertura científica al campo de modelización de terminales de graneles sólidos. Número de artículos publicados por tipo de terminal.



Fuente: Elaboración propia.

Si se analizan los artículos por el tipo de terminal que investigan (ilustración 201), se observa que la mayor atención se ha prestado a las terminales de carbón (22 artículos en todas sus variantes de importación, exportación y transbordo), seguidas de realizaciones válidas tanto para carbón como mineral de hierro (11 artículos), poliprodueto (7 artículos) y mineral de hierro (6 artículos). Otros productos como el grano han atraído muy poco hasta la fecha a la comunidad científica (2 artículo) y algunos otros graneles mayores como la bauxita o fosfatos o los graneles “menores”

(chatarra, otros minerales, astilla de madera, urea, etc...) no han sido, hasta lo que se conoce, cubiertos específicamente por la comunidad científica.

En cuanto a las técnicas de simulación, se pone de manifiesto como en la práctica totalidad se ha utilizado técnicas de simulación en eventos discretos (DES), llamando la atención como otros paradigmas de programación como el basado en agentes (ABS) o sistemas dinámicos (SD) que han surgido con fuerza a partir de los años 2000 no han sido todavía trasladados de una manera destacable a este campo aún cuando ya han venido introduciéndose de manera creciente en la simulación de terminales de contenedores.

De igual modo, se observa como, en general, la simulación se aborda masivamente en terminales mecanizadas mediante cintas mientras que terminales en las que los medios de manipulación son vehículos (camiones y palas) son prácticamente obviados.

Si bien las grandes terminales suelen obedecer a este tipo de equipamiento en superestructura no es menos cierto que pequeñas terminales o terminales poli-producto suelen tener este otro tipo de maquinaria asociada y pudiera resultar un procedimiento de simulación con bastantes puntos en común con los contenedores.

Con todo ello se entiende que tres líneas de actuación pueden emprenderse en el futuro y que son complementarias a algunas otras que ya se han ido citando a lo largo del cuerpo de la presente tesis doctoral:

- Modelización de una mayor variedad de productos.
- Modelización utilizando otros paradigmas de simulación (ABS y SD).
- Modelización de terminales dotadas de otro tipo de maquinaria (vehículos).

4.3 Simulación en terminales de graneles líquidos

El segmento de graneles líquidos en general también ha llamado la atención de las técnicas OR basadas en modelización y simulación.

Esto ha sido especialmente cierto en los tráficos energéticos.

Los primeros estudios (en la década de los 50) fueron los relacionados con los buques de crudo llegando a refinerías y la distribución desde éstas de productos refinados a mercados finales. A este sector se dedicará un apartado específico (apartado 4.3.1)

Más tarde (básicamente en los años 2000) un campo que ha visto como la modelización y optimización ha sido empleada de una manera relevante es el tráfico del gas natural licuado (GNL) al que también se dedicará un capítulo específico (apartado 4.3.2).

Por último, se reserva un apartado a otro tipo de mercancías como productos químicos (apartado 4.3.3).

En el campo de simulación en el sector del petróleo y sus derivados, tal y como se verá a continuación, la mayoría de los problemas referenciados en la literatura científica son del tipo IRP (*“Inventory & Routing Problem”*) y RSP (*“Routing and Scheduling Problem”*) y sólo más recientemente los que se han definido como PISCP (*“Pricing, Inventory & Scheduling Combined Problem”*); existiendo otro grupo de autores que se centran en el estudio de las operaciones de transbordo desde buques de grandes dimensiones a otros de menor tamaño (*“lightering”*) que ya se habían enunciado al hablar de graneles sólidos (apartado 4.2.2).

En el campo del GNL los estudios están algo más diversificados y no se centran únicamente en estudio de enrutamiento y programación de cargamentos, sino que comprometen otra clase de estudios.

4.3.1 Crudo de petróleo y productos petrolíferos.

Como en tantas ocasiones, las aplicaciones militares fueron pioneras y precursoras de futuros campos científicos. Así sucede en el presente caso. Tompkins (1952) en su estudio desarrolla desde el plano teórico un algoritmo para optimizar el suministro de combustible a los barcos de la armada estadounidense. Sus estudios son continuados desde un punto de vista práctico por Flood (1954). Este autor, en base a los datos reales del año 1950 de viajes en lastre de los buques de abastecimiento de la flota (una vez que han suministrado el combustible a los barcos que alimentan) concluye que un modelo computacional de selección de rutas logra ahorrar hasta un 5% de las distancias recorridas.

Dantzig y Fulkerson (1954) citando a los autores anteriores indican que sus modelos presentaban dificultades para poder ser resueltos de una manera eficiente con los procedimientos computacionales disponibles en esas fechas y estos investigadores presentan la primera introducción de técnicas MIP en el campo de programación de buques tanqueros³⁰⁵. En concreto, estos autores estudian como minimizar la flota de petroleros que cumplan un programa de cargas fijo (conocidas de antemano las fechas de carga y descarga). Estos investigadores reconocen que

³⁰⁵ La influencia de estos autores ha sido relevante en este campo. Otros autores como Briskin (1966) o Bellmore *et al.* (1968) se refieren incluso al problema IRP como problema de Dantzig y Fulkerson reconociendo a estos autores como precursores de este campo científico. .

se trata de problemas de gran escala pero que, al abordarse con técnicas MIP se simplifican sustancialmente. Para justificar la introducción de estas técnicas indican que la mayoría de las variables presentan limitaciones para hacerse cero y que las fórmulas de minimización son relativamente simples.

Briskin (1966) presenta también un modelo para realizar una programación de descargas asociadas a barcos de granel líquido en una aplicación con varios puertos de destino y buques. Para este autor, los trabajos de Dantzig y Fulkerson (1954) resolvían el problema de qué barco iba y a dónde iba éste.

Sin embargo, como se ha comentado, se asumían fechas de carga y descargas predeterminadas y sin capacidad de que el modelo proporcionase cuales eran esas fechas óptimas. Este primer modelo presentaba otras limitaciones como eran que sólo permitía una descarga total y la utilización de un único tipo de buque, cuando en la realidad no es extraño esquemas de funcionamiento logístico en la que se producen descargas parciales (un barco descarga en diferentes destinos) y la flota es heterogénea. El modelo desarrollado por Briskin (1966) supera estas limitaciones.

Bellmore *et al.* (1968) continúan avanzando con los trabajos de sus predecesores. Su innovación se centra en introducir en el modelo la posibilidad de que la flota sea insuficiente y que alguno de los cargamentos tenga que ser cancelado (posibilidad no permitida en el problema de Dantzig y Fulkerson para los que el número de buques tiene que ser siempre suficiente para tomar las cargas que se producen).

Bellmore *et al.* (1971) introducen nuevas mejoras al modo de eliminar ciertas restricciones. En este caso se permite que también las cargas sean parciales (no sólo las descargas tal y como ya había introducido Briskin (1966) y que la flota sea heterogénea. La técnica que utilizan estos autores sigue siendo MIP con introducción de algoritmos *branch and bound*.

Everett *et al.* (1972) sintetizan parte de los resultados de un estudio de alcance mucho mayor encargado por la administración de Estados Unidos para planificar el desarrollo de una flota de buques de bandera propia que prácticamente habían desaparecido durante la década de los 60 desplazada por su falta de competitividad³⁰⁶. Este proyecto que data de la época de la administración Nixon en 1969 analiza el número y tamaño óptimo de tres tipos de buques: tanqueros para productos petrolíferos y crudo, tanqueros para transporte de los principales

³⁰⁶ Costes de operación que eran casi el doble y costes de tripulación que eran cuatro veces las de sus competidores según Everett *et al.* (1972).

graneles sólidos y OBO's³⁰⁷ para atender 8 tipos de productos o *comodities* (crudo, mineral de hierro, carbón, fosfato, grano, bauxita, manganeso y cromo).

El objetivo de este estudio era preparar un paquete de medidas de ayuda para lograr que los astilleros norteamericanos resultasen competitivos y, en base a una cartera de pedidos de gran escala, pudiesen acometer unas inversiones de gran alcance que permitiese construir esa cartera de pedidos en los tiempos y el coste requerido (el programa resultó en una recomendación para construir 300 barcos en el periodo 1972-1982).

El modelo que implementan los autores se engloba dentro de programación lineal y era resuelto por el sistema “*Ophelie*” de Control Data Corporation, mientras que las matrices necesarias para alimentar el modelo se construyeron con CDC's Matrix Generation Language.

Mckay y Hartley (1974) utilizan una formulación similar a la de autores anteriores, en este caso para optimizar el suministro de productos petrolíferos a la flota norteamericana a lo largo del mundo. Estos estudios tienen por tanto un fin militar que recuerda a los primeros trabajos de Tompkins (1952) y Flood (1954) y que más tarde serían también abordados por Fisher y Rosenwein (1989).

Baker (1981) presenta los trabajos realizados para la petrolera Exxon y, en concreto, su programa interactivo de programación de buques, estudios que vienen referenciados por otros autores (Al-Yakoob, 1997).

Daskin y Walton (1983) analizan un problema específico que ya se había enunciado al hablar del caso de graneles sólidos. Se trata del “*lightering*” o proceso de transbordo de un buque de mayores dimensiones a otro más pequeño para hacer una distribución regional del producto.

Efectivamente, estos autores explican como por razones económicas en muchos casos conviene realizar el transporte del crudo en buques de grandes dimensiones (usualmente denominados VLCC³⁰⁸ o ULCC³⁰⁹) cuando se trata de viajes transoceánicos (largas distancias) para después transbordar la carga a otros de menores dimensiones que puedan acceder a terminales de descarga (con limitaciones de calado y/o de marea). Estos autores desarrollan un modelo de redes de colas en el que el primer servidor es el VLCC/ULCC y sus clientes demandantes del servicio los buques

³⁰⁷ OBO (acrónimo inglés de *Ore-Bulk-Oil tanker*) es la terminología con la que se conoce un tipo de buques especiales que podían transportar tanto graneles líquidos como sólidos y que se construyeron para optimizar la utilización de los buques y maximizar el número de viajes en carga evitando retornos en lastre. La primera de estas unidades fue el buque Naess Norseman, construido en los astilleros de A. G. Weser para la naviera Norness Shipping en el año 1965. Fueron un tipo de buques con cierto auge en la década de los 70 y 80 pero que hoy han caído en desuso. Fuente: Wikipedia OBO (2017).

³⁰⁸ VLCC es el acrónimo de *Very Large Crude Carrier*.

³⁰⁹ ULCC es el acrónimo de *Ultra Large Crude Carrier*.

más pequeños que se encuentran sin carga y el segundo servidor es la terminal portuaria y sus clientes los barcos de menores dimensiones cargados desde los VLCC/ULCC.

En su modelo los autores asumen que tanto la distribución de tiempos de servicio en la operación de transbordo y descarga en puerto como la distribución de la ley de llegada de buques petroleros es exponencialmente distribuida (llegadas aleatorias) introduciendo como variante un modelo $M/E_k/n$ para las demoras en los buques VLCC. El modelo, por tanto, se resuelve como un clásico ejemplo de colas cíclicas.

Este mismo problema será tratado por sucesivos autores. Entre ellos Andrews *et al.* (1996), Lin *et al.* (2003), Jetlund y Karimi (2004), Reddy *et al.* (2004a y 2004b), Mudrageda *et al.* (2004), Huang y Karimi (2006), Mudrageda y Murphy (2008) y Almaz y Altioik (2012) para el caso de graneles líquidos (crudo de petróleo o productos químicos) y Bhasi y Acharya D. (1997), Jagathy *et al.* (2001), Bhasi (2004), Jagathy y Acharya (2007), Cigolini y Rossi (2010), Cigolini *et al.* (2011) y Cigolini *et al.* (2013) para graneles sólidos (fundamentalmente operaciones de transbordo de carbón alimentando centrales eléctricas).

Brown *et al.* (1987) tratan la programación de cargamentos de crudo de petróleo desde Oriente Medio a Europa y Norte América mediante el software *Elastic Set Partitioning*, modelo que sería después extendido en Bausch *et al.* (1991). Se trata de una aplicación práctica desarrollada para la petrolera Chevron. Según estos investigadores esta herramienta ha venido utilizándose con éxito en el sector del *oil & gas* ya que permite manejar estructuras de costes no lineales (como los que se dan en estas infraestructuras) y aplicar un amplio rango de reglas procedimentales, todo ello con unos requerimientos simples, lo que les capacita para ser acoplados en microordenadores. Para estos autores, las clásicas aproximaciones lineales a modelos de transporte donde el modelo se alimenta con variables como el número de medios (camiones o buques), distancias recorridas o tiempo utilizado para ello son únicamente válidas cuando las características de las flotas son uniformes (mismo tipo de medios con mismo tipo de coste unitario). Sin embargo, la realidad difiere de estas condiciones ideales y allí donde la flota es heterogénea aparecen efectos no lineales (diferentes estructuras de costes y costes unitarios de cada medio). *Elastic Set Partitioning* es capaz de trabajar con esta no-linealidad siendo una aplicación de la familia MIP. Los autores describen la herramienta y algunas aplicaciones de su utilización. Su modelo tiene en cuenta todos los componentes (fijos o variables) de coste de la flota utilizada para el transporte (incluyendo los costes unitarios del buque, sus consumos, costes portuarios o tránsito en canales, ...) y da como resultado la velocidad óptima, la mejor ruta y la programación más ajustada en tiempos computacionales muy cortos.

Con ocasión de la celebración de un congreso en el que se presentaban avances en técnicas OR específicamente centradas en el sector del *oil & gas* celebrado en Toronto (Canadá) en 1991, tres grupos de investigación realizan presentaciones sobre ejercicios de modelización asociados a la logística marítima de refinerías.

Bjørstad y Haugland (1991) presentan un modelo estocástico para el análisis del proceso de mezclado y homogeneización (*blending*) de gasolinas en una refinería teniendo en consideración la incertidumbre que introduce el tiempo entre llegada de buques, su orden de llegada y el tipo de buques que van a recalar a puerto. El modelo presentado es de naturaleza no lineal y tiene en consideración dos aspectos diferenciados: por un lado, la mezcla de producto que hay que realizar en cada cargamento para cumplir las condiciones de calidad requeridas para este barco en concreto (que pueden variar de uno a otro) y, la distribución de los diferentes componentes producidos en la refinería para proporcionar materiales de diferentes composiciones y calidades. En síntesis, estos autores tratan por lo tanto de generar un modelo de transporte que tenga en consideración la cantidad y calidad del producto requerido por cada uno de los clientes de la refinería y, por tanto, que ayude a los gestores de la instalación a programar la llegada de los buques y realizar las operaciones en ellos.

Breton y El-Hachem (1991) trabajan sobre un modelo estocástico para la planificación de *slots* de los barcos que llegan a una refinería para descargar crudo o retirar producto refinado en horizontes de medio y largo plazo. Para estos autores, las soluciones de tipo determinista aplicadas en el pasado sobre procesos que como el llevado a cabo en las refinerías tienen una naturaleza muy estocástica, han conducido a errores en cuanto a las capacidades de las instalaciones de refino, la gestión de los stocks, el suministro de crudo para realizar la producción, etc... Así, en su artículo, discuten sobre procedimientos estocásticos que mejoren el análisis de este tipo de instalaciones, resaltando los problemas a los que deben enfrentarse en su formulación, indicando como pueden superarse y presentando posibilidades de desarrollo y procedimientos computacionales concretos. Como ejemplo, presentan una herramienta específica denominada MARKAL-Québec (Baillard *et al.*, 1985, 1987 y Berger, 1985) que cuenta con un módulo específico de gestión de refinerías y es una evolución del primer modelo conocido como simplemente MARKAL y desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía como un modelo general para el sector de la energía (Fishbone y Abilock, 1981).

Bausch *et al.* (1991) presentan la extensión de los trabajos de Brown *et al.* (1987) que acaban de describirse por lo que se tratarán nuevamente.

Perakis y Bremer (1992) y Bremer y Perakis (1992) continúan con la línea de investigación para la empresa Chevron que había comenzado Brown *et al.* (1987).

Shah (1996) analiza técnicas de programación para el suministro de crudo de petróleo a una refinería y, en ese mismo año, Lee *et al.* (1996) trabajan con técnicas MIP la programación a corto plazo de buques descargando crudo de petróleo en una refinería introduciendo en el modelo las constricciones que supone la gestión del almacenamiento en tanques (problema IRP).

Andrews *et al.* (1996) estudian el caso específico del transbordo desde grandes buques petroleros a otros tanqueros más pequeños para poder suministrar este combustible en la Bahía del río Delaware (Estados Unidos) donde existen problemas de calado en el canal y es necesario realizar

esta operación intermedia (problema de “*lightering*”, ilustración 202). El modelo se utiliza con una finalidad estratégica para evaluar diferentes posibilidades de inversión con las que realizar la operación de la manera más eficiente (entendido por ellos como a menor coste). El transbordo y suministro estudiado entra dentro de un caso real promovido por la empresa Maritrans (encargada de prestar dicho servicio). Dichos estudios para esa empresa, o en el mismo contexto geográfico, son continuados con posterioridad en Mudrageda *et al.* (2004), Mudrageda y Murphy (2008) y Almaz y Altiok (2012).

Ilustración 202. Operación de transbordo de graneles líquidos (“*lightering*”).



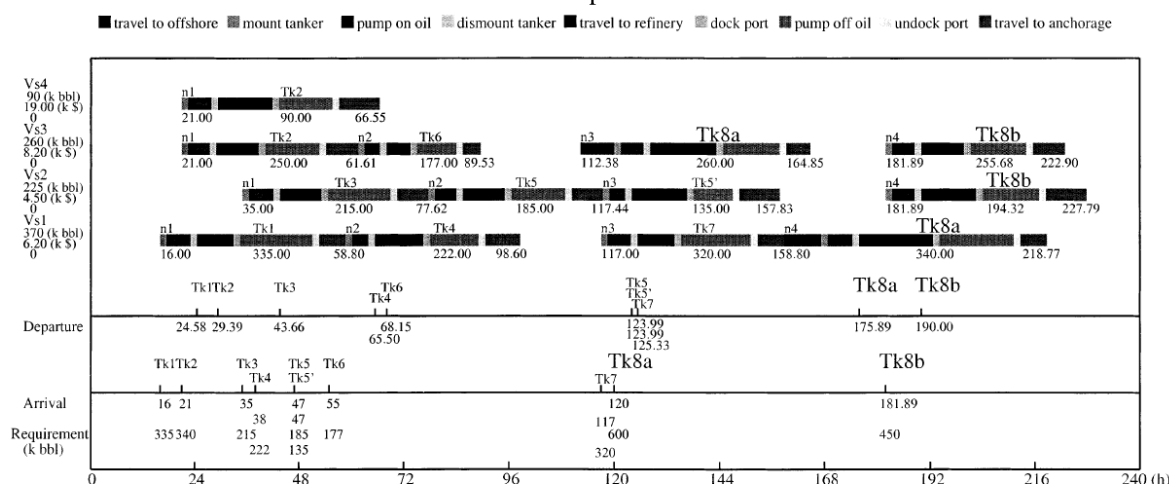
Fuente: <http://swos.net/applications/commercial-marine/lightering-ship-to-ship>

Al-Yakoob (1997) realiza una completa tesis doctoral en la que aborda la optimización en el diseño y utilización de una flota de buques petroleros utilizando un horizonte de planificación evolutivo (Rolling). Estos trabajos son también presentados de manera resumida en Serali *et al.* (1999). Los autores estudian la logística de *Kuwait Petroleum Corporation* mediante formulación del tipo MIP, que es resuelta con la ayuda del software CPLEX-4.0 construyendo un procedimiento de enrutamiento *ad hoc* que sigue las prácticas de programación de esta compañía ofreciendo resultados satisfactorios (mejores que los habituales en esta empresa) en los horizontes de programación usualmente contemplados por esta empresa.

Lin *et al.* (2003) retoman estudios anteriores de simulación relacionados con el transbordo de materiales de un barco a otro (*lightering*) introduciendo en este caso alguna novedad. En efecto, estos autores introducen un modelo matemático en tiempo continuo que se resuelve con MILP y está inspirado en trabajos anteriores de programación a corto plazo de ciertos procesos químicos expuestos en Ierapetritou y Floudas (1998a y 1998b). Este procedimiento se basa en la programación de una secuencia de eventos que es asociada a cada buque (operación de amarre de un buque a otro, bombeo de crudo entre buques, desamarre de buques, viaje de buque a terminal en refinería, bombeo de buque a refinería, desamarre en el atraque de la terminal y viaje de

retorno) y en la asociación a cada uno de estos eventos a una variable binaria (en la que el buque puede estar haciendo dicha tarea o no). El modelo de estos autores introduce como novedad la posibilidad de bombeo desde distintos tanques y la posibilidad de proceder a transbordos parciales o en fases³¹⁰ que junto con la naturaleza de tiempo continuo de su modelo se configuran como la aportación más relevante realizada por estos autores. Los autores verifican sus resultados en tres casos experimentales³¹¹ y desde el punto de vista de las herramientas formulan el modelo en GAMS³¹² y lo resuelven con CPLEX 6.516 en una Workstation HP J-2240.

Ilustración 203. Ejemplo de Diagrama Gantt utilizado para representar los datos del modelo de transbordo de crudo de petróleo.



Fuente: Lin *et al.* (2003).

Reddy *et al.* (2004a y 2004b) vuelven a analizar el problema de transbordo de material desde un VLCC a una refinería pero incorporan ciertas novedades sobre modelos anteriores. Retoman la idea de un modelo en tiempo continuo presentado en Lin *et al.* (2003) pero esta vez el VLCC transporta diversos materiales en diferentes bodegas y estos pueden ser bombeados a tanques al mismo tiempo. Adicionalmente, el modelo permite trasiegos de tanque a tanque reproduciendo más fielmente la operación real de muchas de estas instalaciones. El algoritmo desarrollado por estos autores evita la concentración de discrepancias (que dicen ha sido el mayor problema de

³¹⁰ Los transbordos parciales se refieren al caso en el que el VLCC tiene que ser descargado en dos etapas por razones de calado. Primero se transborda parte de la carga en profundidades offshore y más tarde, cuando el calado disminuye, el buque se mueve a un amarre o mono-boya más protegida donde se realiza el final del transbordo.

³¹¹ En el primer caso se estudió una composición de 7 barcos VLCC alimentando a 4 barcos de diferentes características y que sirven a distintas refinerías con un horizonte de operación de 7 días, en el segundo caso se estudia un proyecto con 12 barcos VLCC que alimentan a 4 barcos que sirven la misma refinería con un plazo de programación de 11 días y en el tercero se analiza una variante del caso 2 en el que en vez de 4 barcos se alimentan una flota también homogénea pero de 7 unidades.

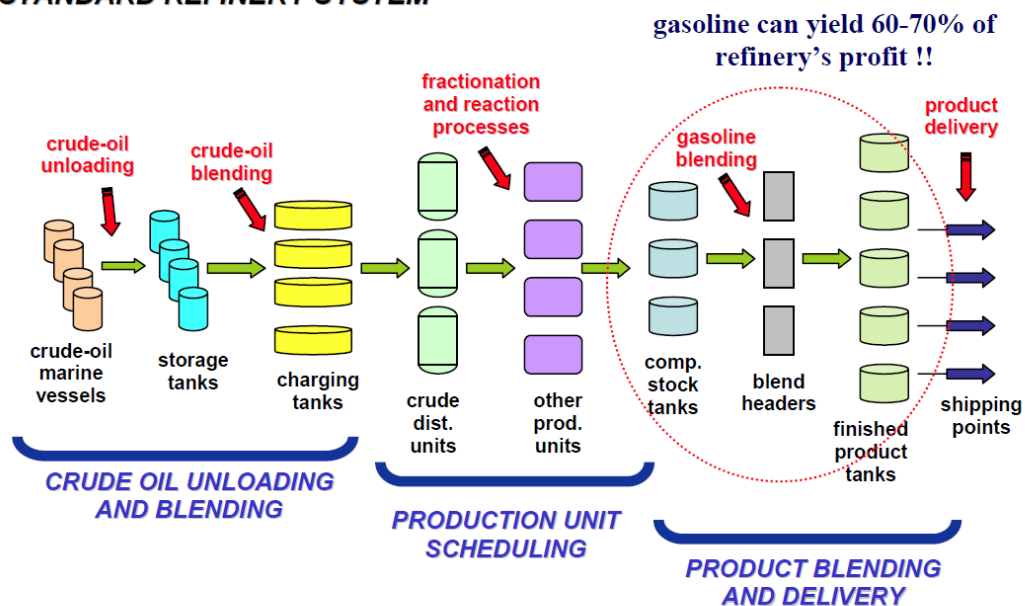
³¹² GAMS, acrónimo de *General Algebraic Modeling System* es un sistema para programación matemática y optimización desarrollado por GAMS Development Corporation (Washington DC, Estados Unidos) que permite trabajar en problemas lineales, no lineales y MIP. (GAMS, 2017).

estos modelos en el pasado) descomponiendo tiempos de programación más largos (utilizan 7 días) en periodos más cortos, utilizando funciones de relajación que proporcionan soluciones exactas intermedias. De igual modo son los primeros autores que proporcionan una comparación entre los resultados obtenidos con un modelo en tiempo discreto y continuo, idea que posteriormente retomarían Huang y Karimi (2006a).

Mendez *et al.* (2004 y 2006) tratan también el caso de graneles líquidos. El caso experimental concreto resuelto por estos autores es la resolución conjunta de la programación de barcos y proceso de mezcla y armonización (“*blending*”) asociadas a las gasolinas producidas en la refinería. Para ello comienzan por una interesante descripción del proceso industrial desarrollado en este tipo de instalaciones que comienza en la descarga y mezcla del crudo de petróleo y que termina en la expedición de los productos finales (gasolina, diésel, queroseno,...) y su carga en los buques (ilustración 204). Desde el punto de vista técnico los autores resuelven el problema mediante técnicas MILP que aplican tanto con técnicas de tiempo discreto como representaciones del modelo en tiempo continuo lo que supone una novedad sobre desarrollos anteriores.

Ilustración 204. Esquema de funcionamiento de una refinería. Fuente: Mendez *et al.* (2004).

STANDARD REFINERY SYSTEM



Persson y Göthe-Lundgren (2005) desarrollan un modelo para formular el problema IRP asociado a una refinería y el transporte de los productos en ella elaborados a depósitos de distribución aguas abajo de la cadena de suministro. Chequean su modelo con las refinerías del grupo Nynas (3

refinerías³¹³), utilizando cuatro productos en el transporte y contabilizando un total de 15 depósitos.

Huang y Karimi (2006a) estudian también el problema de transbordo de crudo entre buques. Como ya introducirían Reddy *et al.* (2004a y 2004b) los buques de estos autores permiten una compartimentación de la carga por calidades en diferentes tanques. Estos barcos sirven a diferentes refinerías dentro de una misma área geográfica. A parte de esta característica, los autores introducen nuevas funcionalidades al modelo como son la limitación del número de operaciones de transferencia que se realizan simultáneamente o la variación de la densidad del crudo con el tiempo (y con ello de los ritmos de transbordo). Desarrollan dos modelos MILP en tiempo continuo basados en programación de *slots* con dos funciones objetivo: por un lado minimizar las esperas de los buques y por otro minimizar los costes de fletamento. Realizan también una nueva comparación entre su modelo y los desarrollados por otros autores bajo técnicas discretas, llegando a la conclusión de que su modelo proporciona soluciones óptimas con mayor velocidad.

Kobayashi y Kubo (2010) tratan la optimización de la programación de buques tanque mediante técnicas de descomposición, generación de columnas y redes tiempo-espacio. Su base experimental es el problema de transporte de productos petrolíferos en Japón que según los autores se desarrolla en un ambiente con grandes incertidumbres (eventos inesperados desde el punto de vista de las operaciones marítimo – portuarios y evolución dinámica de la demanda) que obliga a revisar los planes de transporte constantemente y, por ello, hacen aconsejable la adopción de modelos que ayuden a tomar las mejores decisiones. En los casos investigados por estos autores indican que se ha conseguido un ahorro de costes entre el 5 y el 16% sobre los que se habrían obtenido sin la implementación del modelo por ellos desarrollados. Desde el punto de vista computacional los autores descomponen el problema en dos sub-problemas (el primero relativo a la ruta de los barcos y el segundo en el establecimiento de las relaciones entre los puertos de carga y descarga) que resuelven mediante las técnicas ya comentadas de generación de columnas y redes tiempo-espacio.

Esta misma base experimental es también explorada en Kobayashi (2010) pero esta vez desde una perspectiva más estratégica y utilizando técnicas de programación dinámica que permiten trabajar con horizontes de programación a largo plazo. En su modelo la partición del problema es modificada de tal manera que pueda ser abordada desde técnicas de generación de rutas.

Furman *et al.* (2011) también analizan bajo técnicas de simulación las operaciones marítimas de la petrolera ExxonMobil haciendo hincapié en la componente *downstream* de sus actividades. En

³¹³ Esta compañía cuenta con tres refinerías en Alemania (Nynäshamn, Gothenburgo y Hamburgo) y otra en Reino Unido junto con la compañía Shell. (véase <https://www.nynas.com/en/about/Our-business/our-refineries/>).

concreto analizan el suministro de gasoil desde diferentes puntos de suministro en Europa a sus refinerías en Estados Unidos. Utilizan técnicas MIP para resolver el IRP.

Estos estudios son continuados por el propio Furman junto con otros en Engineer *et al.* (2012) donde acoplan un algoritmo para tener en cuenta los precios del producto en un algoritmo que podría definirse como PISCP (*Pricing, Inventory & Scheduling Combined Problem*) y que aplican a una empresa petrolera. La introducción del precio en la formulación se considera un avance muy relevante en la arquitectura de este tipo de modelos que responde a las necesidades reales del mercado.

Hennig *et al.* (2012) también utilizan técnicas MIP para tratar el transporte de crudo de petróleo por vía marítima en un ya clásico problema que ellos definen como “*maritime oil tanker routing and scheduling problem*”. Como en estudios anteriores, su objetivo es encontrar las rutas óptimas (con menor coste) teniendo en consideración una composición dada de flota (con características heterogéneas) que tiene que transportar múltiples productos. Para ello diseñan un modelo del tipo “*path flow*” en el que cada camino es una ruta. En su modelo introducen como elemento más llamativo que las características (calidad) del material en el puerto de origen y destino no se hacen coincidir previamente por lo que cierta arbitrariedad que hay que gestionar es introducida en el modelo.

Agra *et al.* (2012, 2013, 2014 y 2016) en el mismo contexto de optimización de rutas de buques (problemas IRP o RSP) analizan el transporte de corta distancia y cabotaje de fueloil en Cabo Verde. El objetivo para estos autores es determinar las políticas de enrutamiento óptimas, minimizando los costes de operación pero manteniendo en todo momento una política de *stocks* dentro de límites establecidos. Desde el punto de vista computacional proponen una formulación del tipo *arc-load flow*. En su ejercicio toman horizontes de planificación de varios meses.

Siddiqui y Verma (2013 y 2015) vuelven a abordar el problema de programación y optimización de rutas en el transporte de crudo de petróleo desde Oriente Medio a Europa y Norte América. Estos autores, a la clásica aproximación desde la perspectiva de optimización de coste mediante técnicas MIP, introducen una segunda componente como es el riesgo asociado a accidentes y episodios de contaminación accidental. En tal sentido hablan de una función con dos objetivos (coste y riesgo) que aplican a una flota heterogénea de petroleros. En su investigación concluyen que no siempre la ruta más corta es la óptima pues, si bien puede ser la de menor coste de operación puede introducir mayores riesgos y costes asociados por seguros, potenciales indemnizaciones, etc... Este enfoque ya había sido tratado por Li *et al.* (1996), Douligieris *et al.* (1997), Iakovou *et al.* (1999) y Iakovou (2001).

Según estos autores, resulta relevante la poca atención científica que ha despertado el transporte marítimo de mercancías peligrosas, campo científico dominado por el transporte terrestre. Señalan tres áreas donde sí que se pueden localizar algunas realizaciones: valoración de

riesgos³¹⁴, estimación de los costes de contaminación accidental³¹⁵ y problemas de selección de rutas basados en criterios de riesgo³¹⁶.

4.3.2 Simulación en terminales de GNL.

4.3.2.1 El tráfico de GNL en el contexto marítimo – portuario.

En los últimos años el tráfico de GNL ha crecido de una manera mucho más relevante que otros a nivel mundial (UNCTAD, 2015).

La evolución de este tráfico específico y sus implicaciones en el desarrollo de infraestructuras y servicios portuarios fueron cubiertos por de la Peña y Canales (2012) quienes al describir este mercado señalaban siete características fundamentales:

- Flujos muy influenciados por una dinámica de precios con una altísima volatilidad temporal y diferenciales espaciales entre los distintos mercados finales (América, Europa, *Far East*);
- Mercancía que desde el lado de la demanda está sometida a una fuerte estacionalidad invierno/verano que obliga a gestionar adecuadamente los picos y valles e introduce necesidades logísticas concretas que se traducen en una gestión activa de *stocks* y almacenamiento que afectan a los tráficos portuarios;
- El GNL se presenta como una mercancía con claros tráficos complementarios y/o sustitutivos (gas por tubería, carbón, fueloil, etc.), sujeto a incertidumbres de mercado relacionados con políticas energéticas y decisiones geopolíticas;
- Se trata de un sector intensivo en capital, con un altísimo grado de inversión en toda la cadena logística (especialmente en las componentes *up* y *midstream*) y que obliga a la firma de acuerdos de suministro a largo plazo entre productores y compradores, y al diseño de cadenas de suministro que introducen restricciones contractuales especiales, condicionando en

³¹⁴ Dentro del primer grupo citan a Grigalunas *et al.* (1988), Li *et al.* (1996), Iakovou *et al.* (1999), Yudhbir y Iakovou (2001), Harrauld *et al.* (1998), Merrick *et al.* (2000), Ulusçu *et al.* (2009), Siddiqui y Verma (2013) en el campo del transporte de crudo de petróleo y Martínez y Lambert (2010) y Vanem *et al.* (2008a) en el campo del GNL.

³¹⁵ Dentro del segundo destaca, además de sus trabajos incluidos en Siddiqui y Verma (2013), a Etkin (1999 y 2000), Vanem *et al.* (2008b), Yamada (2009), Kontovas *et al.* (2010) y Psarros *et al.* (2011). Además, se podrían incluir también a Moller *et al.* (1987) y Ofiara (2002).

³¹⁶ Como realizaciones dentro del tercer grupo señalan a parte de sus trabajos a los ya citados Li *et al.* (1996), Iakovou *et al.* (1999) y Iakovou (2001).

muchos casos la logística de dichos tráfico (cláusulas *take or pay*, *deliver or pay*, *profit sharing* y cláusulas de destino, etc.);

- Las especificidades técnicas del transporte del GNL introducen características muy singulares en dichos tráfico. Se trata, fundamentalmente, del proceso de *boil-off* natural (BOG) en el que un porcentaje de la carga transportada se evapora, obligando al diseño de cadenas logísticas mucho más ajustadas que en otros casos con el objetivo de minimizar pérdidas de transporte (este proceso está empujando a la industria hacia nuevas tecnologías de optimización);
- Es un mercado, ciertamente, vulnerable a factores exógenos (climatología, catástrofes naturales, crisis energéticas, inestabilidades políticas o guerras, etc.);
- Es un mercado muy abierto con un número muy relevante de actores tanto del lado de la producción y del consumo como de agentes de la propia cadena logística.

Varios de estas características, si no todas ellas, hacen del tráfico de GNL un firme candidato a ser escrutado por técnicas de investigación operativa para, mediante ejercicios de simulación, realizar tareas de optimización y apoyo a la toma de decisión, tanto desde el punto de vista operativo (programación de operaciones y asignación de medios), como táctico o estratégico (selección de proyectos de inversión), con el objetivo último de incrementar los rendimientos y disminuir los costes unitarios.

En los últimos años se han venido publicando artículos en relación a la optimización de la cadena logística del GNL, sin embargo no se ha encontrado ninguno que los analice en su conjunto, los clasifique, estudie cómo han venido evolucionando y, finalmente, proponga futuras líneas de investigación.

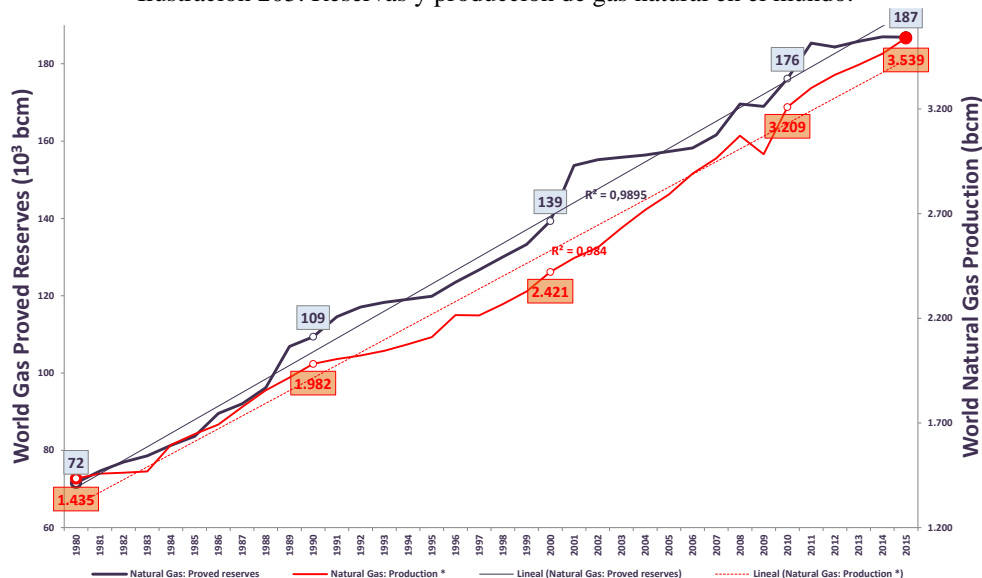
Este es el objetivo del presente apartado presentando un ejemplo de cómo las técnicas de simulación y modelización se han introducido también en el ámbito específico de los graneles líquidos.

4.3.2.2 El mercado de GNL y su cadena logística.

El gas natural ha experimentado una dinámica de crecimiento continuo en los últimos años (UNCTAD, 2015). Así lo confirma BP Statistical Review (2016). Mientras que a principios de los años 80 las reservas mundiales se situaban en el entorno de 72 trillones de metros cúbicos (Tcm) y la producción en 1.435 billones de metros cúbicos anuales (bcma), estas cifras se habían multiplicado por 2 en apenas dos décadas con unas reservas de 139 Tcm y una producción de 2.421 bcma en el año 2000. Esta dinámica ha continuado hasta nuestros días y las reservas

probadas en el año 2015 se han situado en 187 Tcm y la producción hasta 3.539 bcma (ilustración 205).

Ilustración 205. Reservas y producción de gas natural en el mundo.



Fuente: Elaboración propia con datos del BP Statistical Review (2016).

Tradicionalmente el gas natural alcanza los centros de consumo desde los de producción a través de dos cadenas logísticas diferenciadas. En la primera, el gas natural es transportado en todo momento por tubería en estado gaseoso; y, en la segunda, el gas natural se transforma en GNL en una planta de licuefacción, realizando parte del transporte mediante medio marítimo en estado líquido. En este último caso, la operación compromete dos instalaciones portuarias; la de carga (donde está situada la planta de licuefacción) y la descarga (donde se sitúa la de regasificación), además de un buque metanero para el transporte entre ambos.

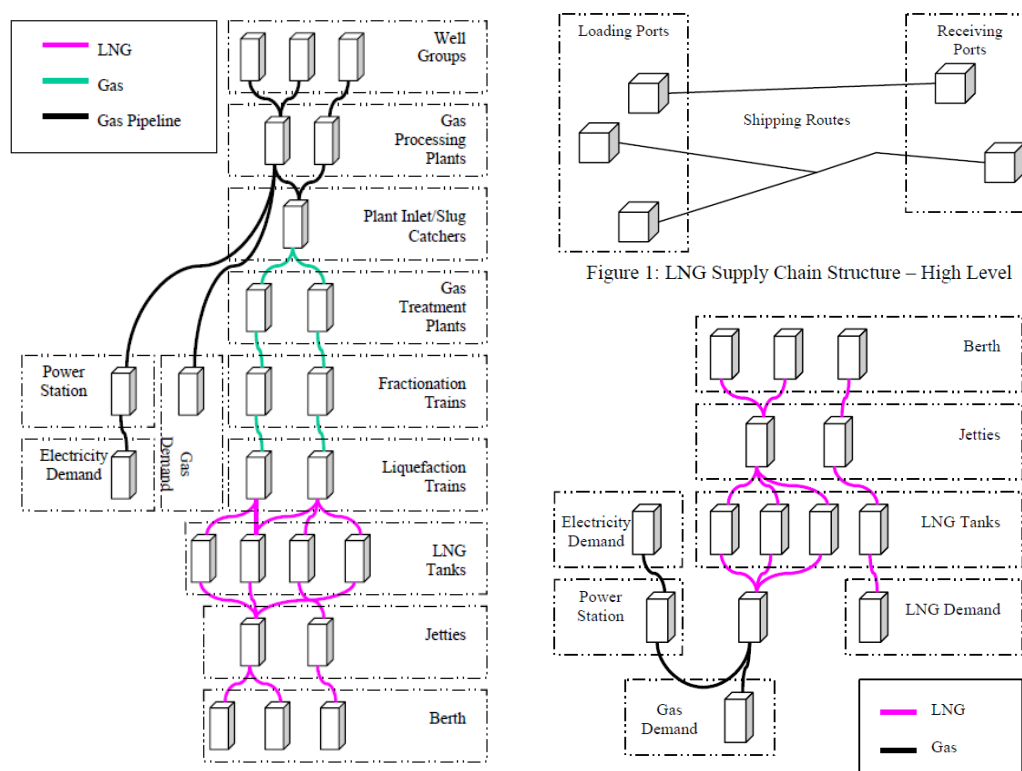
Stchedroff y Cheng (2003), describen con cierto grado de detalle la cadena logística del gas natural (ilustración 206) y que, como acaba de explicarse, dividen en dos modos: gas por tubería y GNL; o gas natural en fase líquida transportado por medios marítimos a temperatura criogénica (-163°C). La cadena comienza en los pozos de producción desde donde tras ser extraído se transporta por tubería a las plantas de procesamiento previo y de ahí bien a centros de consumo (que los autores simplifican como centrales eléctricas pero que también pueden abarcar sector doméstico-residencial, transporte o industria); bien a plantas de licuefacción (para lo que exigen un tratamiento previo adicional y su paso por una unidad de fraccionamiento antes de ser tratados en los trenes de licuefacción).

Una vez licuado, el gas se almacena en tanques de GNL a la espera de la llegada de buques para su carga y transporte hasta el puerto de destino. Allí el barco descarga el GNL a tanques, desde donde bien se regasifica y transporta por tubería a centros de consumo o se carga en cisternas en

forma de GNL para su transporte por este medio hacia centros de consumo o plantas satélite de menores dimensiones.

Obviamente, la descripción de Stchedroff y Cheng (2003) representa una simplificación en la que se omiten algunos elementos de la cadena (estaciones de compresión, bombeo, etc.) u otras alternativas logísticas (por ejemplo, almacenamiento subterráneo o transporte mediante técnicas de gas presurizado o CNG³¹⁷), pero es válida a los efectos del presente trabajo.

Ilustración 206 Ladena logística del gas natural y el GNL.



Fuente: Stchedroff y Cheng (2003).

Los orígenes del GNL como tráfico portuario y de la cadena logística que ha generado se remontan al año 1957. En este año se presenta un primer prototipo de buque metanero “*Methane Pioneer*”, de 5.000 m³ de capacidad que realizó las primeras pruebas entre Lake Charles (Estados Unidos) y el Golfo de México en octubre de 1958, y el primer trayecto transatlántico entre Lake Charles (Estados Unidos) y Canvey Island (Reino Unido) en enero de 1959. A este proyecto le siguió el que lideró *Gaz de France* cuando en marzo de 1961 da sus primeros pasos el buque experimental “*Beauvais*” (pruebas de mar en marzo de 1962 en las costas francesas en el entorno de Bellelle y

317

CNG es el acrónimo de *Compressed Natural Gas*.

la Bahía de Quiberon) fruto de cuyo proyecto se diseñan y construyen el “*Methane Princess*” y el “*Methane Progress*” barcos con una capacidad superior (26.450 m^3) concebidos para el transporte de gas desde Argelia (terminal de Skikda inaugurada en 1972) hasta la terminal de Canvey Island (Reino Unido).

Desde esos años siguen desarrollándose proyectos de GNL en el mundo que, en un principio, compartían como característica general que eran iniciativas punto a punto (ideadas desde una instalación concreta de licuefacción y que servían también a una o unas pocas plantas de regasificación en destino), con medios dedicados (los barcos, usualmente, se utilizaban en una logística circular sirviendo dichas plantas de licuefacción y regasificación y sin incorporarse a otras rutas) y basados en contratos de largo plazo (20 años o superior) tanto en lo que se refería al suministro de gas natural como de fletamento de los buques.

Desde entonces, el GNL se ha configurado como uno de los tráficos de mayor relevancia en el concierto marítimo-portuario actual, tanto por el volumen de comercio que genera anualmente; como por la especialización de sus operaciones, las perspectivas de crecimiento futuro asociados a nuevos proyectos promovidos en el marco de nuevas estrategias energéticas a nivel mundial o la rápida evolución tecnológica que dicho sector ha experimentado en su, relativamente, corta vida (UNCTAD, 2015).

Según la información de International Gas Union (IGU, 2016), en el año 2015 se comercializaron 245 millones de toneladas (Mtpa) de GNL, de las cuales setenta y dos (72) Mtpa correspondieron al *mercado spot* (29%) mientras que 173 Mtpa correspondían a contratos de largo plazo (71%) (ilustración 207). Con la información del último año disponible, se puede señalar que el GNL alcanzó una cuota de mercado del 32% con respecto del total del volumen de gas natural comercializado internacionalmente (338 bcma de GNL y 704 bcma de gas por tubería, con un total de 1.042 bcma de gas natural comercializado).

Conforme IGU (2016), esta cuota de mercado es del 10% si se incluyen también el consumo de gas interno (es decir aquel que se consume en el mismo país que se produce), si bien las cuotas de crecimiento interanual del GNL en el periodo 2000-2014 se situaban en el 6.6% más del doble del 3.0% del gas por tubería y casi cuatro veces del 1.8% del gas consumido internamente (ilustración 208).

Ilustración 207. Volumen de tráfico de GNL en contratos *spot* (non Long-Term trade) y participación del GNL en el tráfico total de gas natural: 1995-2015.

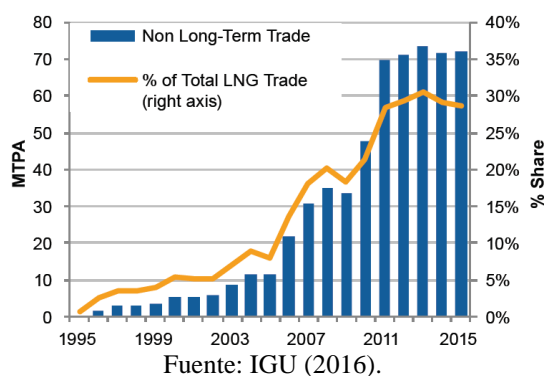
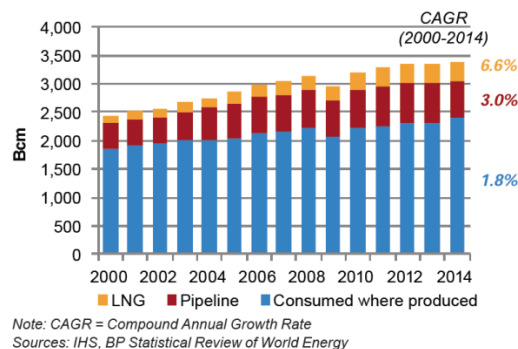


Ilustración 208. Volumen de tráfico de GNL 2000-2014.

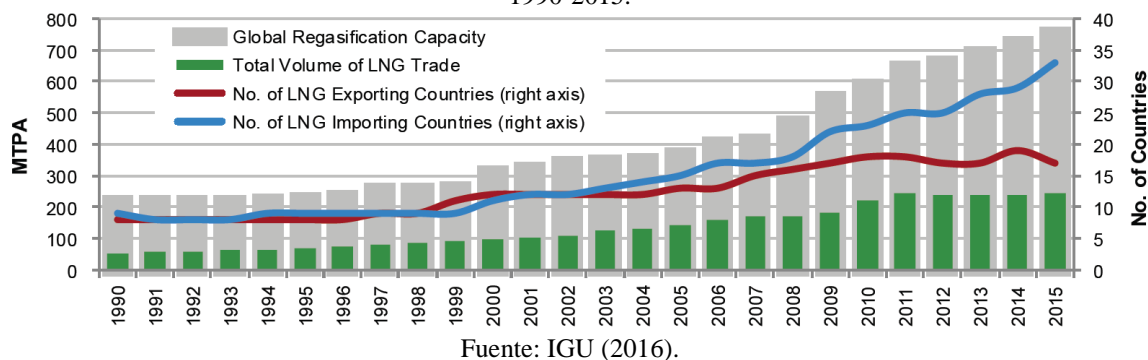


Fuente: IGU (2016).

La capacidad de licuefacción a nivel mundial alcanzó las 302 Mtpa y la de regasificación en terminales de descarga a 757 Mtpa, estimándose que de este total 77 Mtpa correspondía a unidades FRSU (*floating, regasification and storage units*)³¹⁸.

En la ilustración 209 se presenta la evolución del tráfico de GNL en el periodo 1990-2015, donde se observa que en el año 1990, el número de países con capacidad de exportar o con instalaciones capaces de recibir este producto eran 9. Dos décadas después, los países exportadores son 20 (más del doble) y los importadores casi 35 (casi cuatro veces).

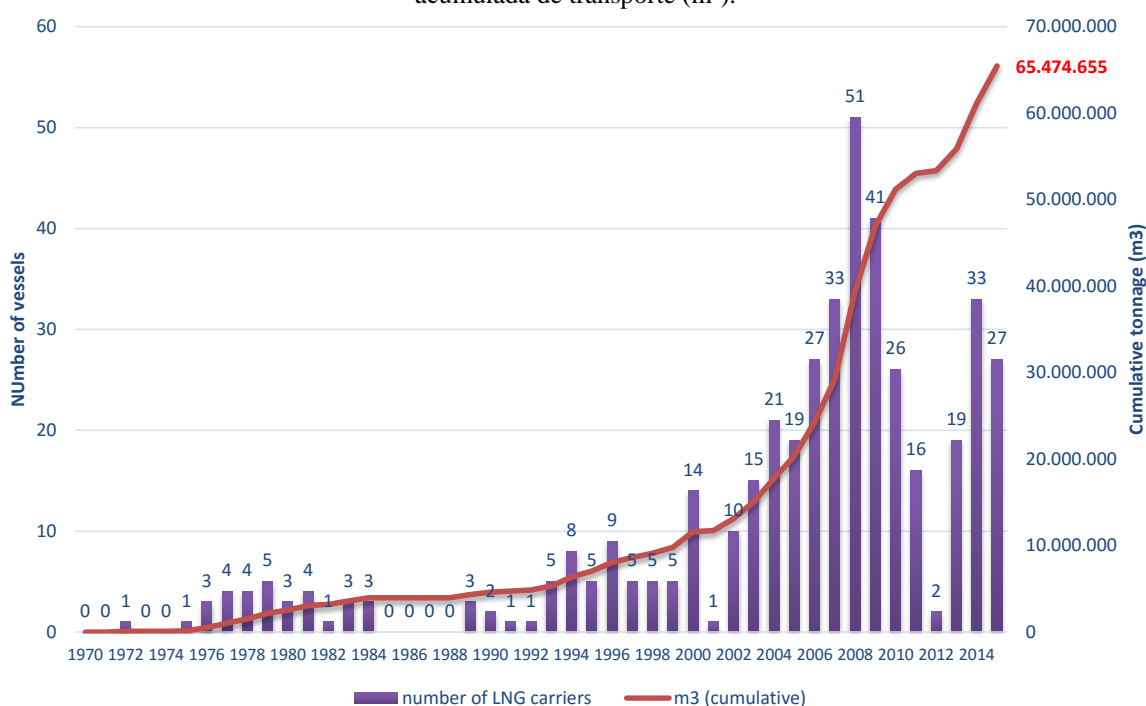
Ilustración 209. Capacidad de Regasificación y número de países exportadores e importadores de GNL 1990-2015.



³¹⁸ FRSU (acrónimo de *floating, regasification and storage units*) es un tecnicismo utilizado en el mercado del GNL para referirse a unidades de regasificación instaladas en medios flotantes (usualmente buques metaneros reconvertidos). La operación en estas unidades se realiza mediante un transbordo de GNL desde el buque metanero al FRSU y desde éste su regasificación e inyección a la red de tuberías. La operación puede incluir un depósito intermedio de GNL en los tanques del FRSU para minimizar el tiempo de permanencia del buque metanero abarloado al FRSU en el proceso de trasbordo de material.

Gibson (2016), indica que el número de barcos gaseros de dimensiones superiores a 1.000 m³ en operación a finales de 2015 era de 436. En la ilustración 210 se presenta la información sobre el número de entregas por año y la capacidad de transporte acumulado. Se observa como en 2015 la capacidad ha superado los 65 Mtpa, y como se ha producido un auténtico repunte de entregas en el periodo 2005-2010 (con un pico de 51 entregas en el año 2008). Esta información permite resaltar la relativa juventud de la flota y las perspectivas del mercado sobre este tráfico, ya que en 2015 se han realizado 4.057 viajes lo que supone más de 9.000 operaciones portuarias (IGU, 2016).

Ilustración 210. Número de buques metaneros en operación por año de entrega de los mismos y capacidad acumulada de transporte (m³).



Fuente: Elaboración propia con datos de Gibson (2016).

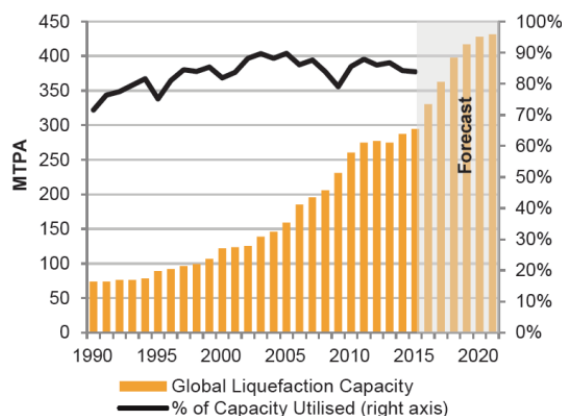
En la ilustración 211 se presenta la evolución experimentada y perspectivas de crecimiento en lo que se refiere a terminales de licuefacción, que lejos de relajarse parece que va a verse incrementada en un futuro si se cumplen las expectativas actuales para la década del 2020. Así, mientras que a finales de 2015 la capacidad de licuefacción a nivel mundial era de 302 Mtpa anuales (con una utilización del 84%), en enero de 2016 se encontraban en construcción proyectos para añadir 142 Mtpa adicionales en el año 2022 y sólo en el sector del *floating* LNG (FLNG)³¹⁹ propuestas de inversión para añadir 171 Mtpa más.

³¹⁹ *Floating LNG* o *FLNG* es el tecnicismo usado en el mercado del GNL para referirse a unidades de licuefacción instaladas sobre un medio flotante

En la ilustración 212 se observa que esta dinámica de crecimiento se replica en las terminales de regasificación que tienen una capacidad mundial de 757 Mtpa a finales del 2015 (con un grado de utilización del 33%), pero, con proyectos en ejecución en enero de 2016 que incorporarán 55 Mtpa en el año 2022.

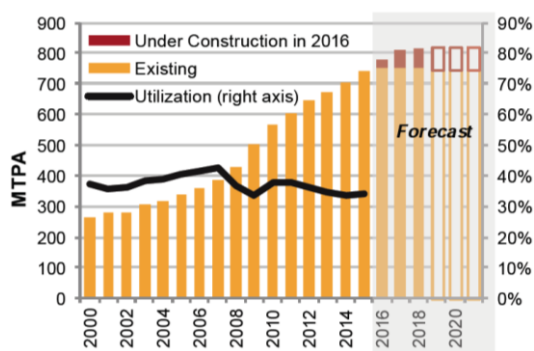
Del lado del transporte marítimo a los 436 barcos en operación a finales de 2015 habría que añadir otras 146 unidades en construcción (IGU, 2016). Así, tan solo en 5 años y en base a proyectos en ejecución e inversiones de aumento de capacidad tomadas por los operadores, la capacidad de licuefacción se verá incrementada en un 46%, la regasificación en un 7,2% y la de transporte en un 33%.

Ilustración 211. Capacidad de licuefacción y grado de utilización 1990-2021.



Fuente: IGU (2016).

Ilustración 212. Capacidad de regasificación y su grado de utilización 1990-2021.

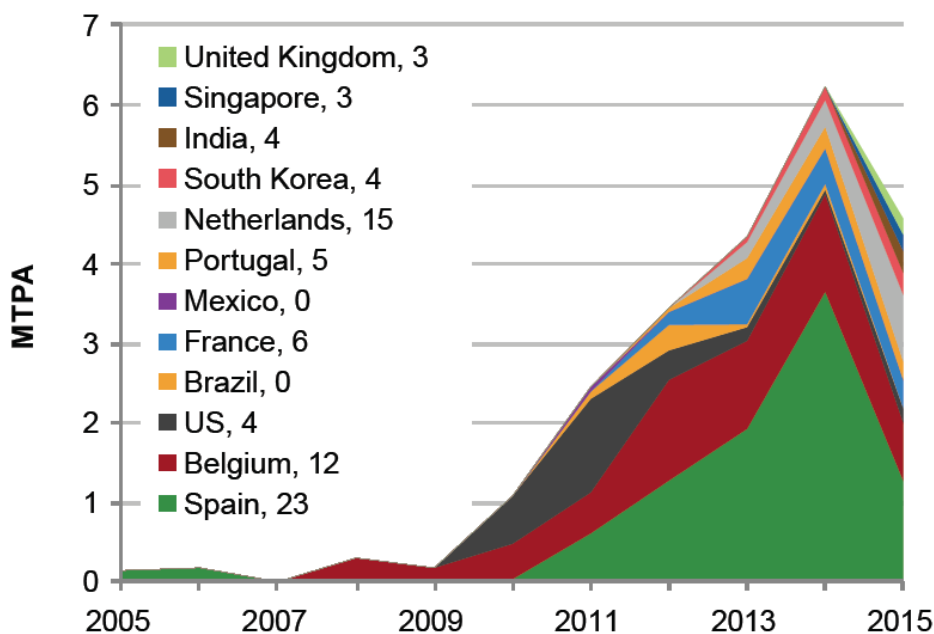


Fuente: IGU (2016).

Otro proceso que ha experimentado la industria es la aparición de operaciones de re-exportación de cargamentos de GNL, por la que un cargamento llega a descargarse en una terminal de recepción para posteriormente volver a cargarse y remitirse a un segundo destino (ilustración 213). Las razones de este aparente uso ineficiente de los recursos hay que verlo más en unas condiciones de contratación rígidas que imponen cláusulas de destino al comprador (y le obligan a tomar posesión del producto en determinados puertos y no en otros), que en una optimización logística de los *stocks* o de la flota de metaneros (utilizando para ello la capacidad de almacenamiento instalada y potencialmente ociosa en los puertos de recepción). En el año 2015 se alcanzaron los 4,6 Mtpa de re-exportación (bajando desde el pico de 6,3 millones del año 2014) con un total de 12 países participando de este nuevo mercado (antes del año 2010 estas operaciones eran prácticamente inexistentes). Obviamente, este proceso de re-exportación encuentra su lógica cuando la demanda y/o precios en el país de primer destino en relación a la demanda y/o precios de segundos destinos se ve afectada por un fuerte diferencial de tal modo que los extracostes de descarga, transporte y carga intermedios se ven compensados por un mayor margen comercial. De igual modo, como condición indispensable la empresa que realiza la re-

exportación debe tener capacidad de transporte marítimo suficiente, algo que no es siempre posible.

Ilustración 213. Operaciones de re-exportación por países 2005-2015³²⁰.



Fuente: IGU (2016).

Avanzando en otra característica del mercado del gas, en la ilustración 214 se pone de manifiesto la altísima volatilidad temporal de este producto, al tiempo que se observan los altísimos diferenciales de precio entre distintos mercados.

Mientras que los compradores japoneses estaban pagando de media por el GNL 16.75 USD/MMBtu en el año 2012, un comprador de Estados Unidos tenía como referencia un precio 6 veces menor de 2.76 USD/MMBtu (salvedad sea hecha de que en un caso no se incorporan costes de licuefacción y transporte marítimo mientras que en otro si está incluido por lo que para hacer una comparación en sentido estricto habría que añadir al coste del gas en Estados Unidos el coste de su licuefacción y transporte a posición CIF en Japón).

En la ilustración 215 se compara la media anual del precio del gas natural y del petróleo para el mismo periodo en un mercado de referencia (Estados Unidos). Con la información disponible se observa que hasta mediados de la década del 2000 ambos productos seguían una evolución muy parecida y presentaban cierta equivalencia en términos de precio, pero a partir de 2005 se presenta

³²⁰ El número de la leyenda en la ilustración 213 representa el número de operaciones de re-exportación en el año 2015. Las cifras de re-exportación excluyen los volúmenes que fueron descargados y recargados en el mismo país.

una fuerte “*decoupling*”, ya que el precio del gas natural experimenta una tendencia sostenida a la baja (como respuesta a la disponibilidad de nuevas reservas de *shale gas* descubiertas en épocas anteriores y que empezaban a entrar en producción), mientras que el precio del petróleo muestra una tendencia alcista (incluso superado el descenso que se produjo en el año 2008 y salvedad sea hecha de los nuevos descensos experimentados tras la crisis energética de 2014, cuya recuperación es a día de hoy una incógnita a despejar en los meses venideros).

Ilustración 214. Evolución comparada del precio del gas natural de referencia en Estados Unidos (Índice Henry Hub) y del GNL en Japón. Fuente: BP Statistical Review (2016), elaboración propia.

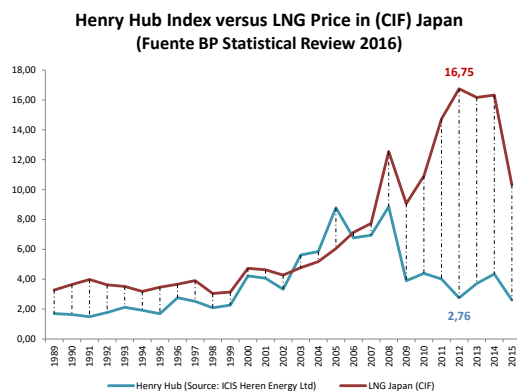
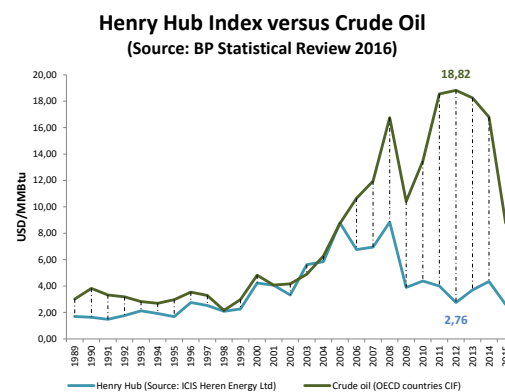


Ilustración 215. Evolución comparada de precio de gas natural en Estados Unidos (índice Henry Hub) y del precio de petróleo (precio medio CIF en países OECD). Fuente: BP Statistical Review (2016), elaboración propia.



Como resumen del mercado GNL se puede señalar:

- La cuota de mercado del GNL con respecto al gas natural por tubería comercializado internacionalmente ha crecido exponencialmente. Representaba el 15.6% en el año 1980, y en 2015 alcanza el 32%.
- Por otro lado, mientras que las transacciones pre-2000 estaban basadas, fundamentalmente, en contratos de largo plazo donde el 95% del volumen comercializado era en base a estos contratos, en la década del 2010 este volumen desciende al 65%. Esto hace que las transacciones sean más rápidas y que la cadena logística tenga que responder con mayor flexibilidad a los cambios de demanda (consumo) y de oferta (producción) y que en las operaciones actúen mayor número de agentes, surgiendo como una nueva figura las casas de trading o las empresas mixtas que optimizan sus portafolios con varios puntos de suministro y entrega (usualmente conocidas como casas agregadoras).
- La aparición de unidades flotantes de regasificación (RFSU) y licuefacción (FLNG), y la presencia en el mercado de capacidad de transporte liberada que no precisa servir a un proyecto concreto, pudiendo operar en términos de *mercado spot*, introduce nuevos elementos

de flexibilidad a tener en cuenta en una gestión de optimización de la cadena de valor del GNL.

- Los precios experimentan una fuerte variación regional, lo que facilita el comercio de este producto entre unas regiones y otras, actuando los diferenciales de precios como un factor catalizador del tráfico marítimo de esta mercancía al tiempo que consolidan una tendencia de desacople con respecto a los precios del petróleo (mientras que ambos precios se comportaban de una manera parecida hasta mediados de los años 2005).

En síntesis, el mercado del GNL está experimentando una evolución muy significativa (tanto en términos de crecimiento como en el tipo de operaciones que se realizan), aumentando su flexibilidad (mayor número de transacciones *spot* con un mayor número de países de origen y destino) y con capacidades todavía ociosas o, al menos, optimizables.

Con ello parece haberse roto definitivamente el histórico encuadre de cadenas logísticas por proyectos concretos con una visión estática. Hoy se mueve más GNL, lo hacen más actores y en una dinámica de competitividad muy fuerte.

En este contexto, el apoyo científico en la optimización de la cadena de suministro con un enfoque de simulación parece sin duda ineludible y la oportunidad del campo de investigación operativa de añadir valor en este proceso se antoja muy adecuada. Así, como punto de partida y preparación de futuros estudios se presenta a continuación un estado del arte de la simulación de cadenas logísticas de GNL para más adelante proponer futuras líneas de investigación.

4.3.2.3 Revisión bibliográfica de modelos de simulación en terminales de GNL.

4.3.2.3.1 Resumen de estudios de simulación sobre la cadena del GNL y clasificación por temática cubierta, técnica utilizada y base experimental implementada.

El estudio de la cadena de suministro del GNL y, concretamente, la optimización de la flota de buques gaseros y la programación de sus operaciones portuarias (dentro del problema comúnmente conocido como integración del *routing and scheduling problem*) es una excepción al todavía relativo poco interés que hasta la fecha ha suscitado entre la comunidad científica de investigación operativa, centrada en otros ambientes portuarios (terminales de contenedores).

Este problema específico (cadena de suministro de GNL) ha sido cubierto desde comienzos de la década de los 2000 como consecuencia de la rápida expansión que este tráfico ha experimentado en los últimos años; el dinamismo del mercado; y la mayor necesidad de optimización de estas operaciones, debido a ciertas particularidades técnicas y al alto coste de dichos buques en comparación con otras clases.

De hecho, en el marco de la presente investigación se han encontrado un total de 27 referencias bibliográficas que a continuación se resumen de manera esquemática. Efectivamente, en la tabla 30 se indican autores, problema resuelto, algoritmo y software utilizado y experimento de simulación cubierto. Más adelante se describirán sucintamente cada uno de estos estudios.

Tabla 30. Referencias bibliográficas en relación al tráfico y terminales de GNL.

Nº	Autor	Problema	Algoritmo / Software	Base Experimental
1.	Kuwahara <i>et al.</i> (2000)	Optimización de Flota y planificación del transporte de GNL (<i>Routing and Scheduling Problem</i>).	Modelo estocástico utilizando técnicas MINLP (<i>mix integer non-linear programming</i>).	Suministro de GNL en la región de Pará (Brasil).
2.	Ainouche <i>et al.</i> (2002)	Optimización de cadena Parcial de Cadena de Suministro. Componente <i>upstream</i> (desde producción hasta planta de licuefacción).	Modelo estocástico utilizando técnicas MINLP (<i>mix integer non-linear programming</i>).	Producción de gas en Hassi R'mel (Argelia) y planta de licuefacción / una terminal de exportación (Skidda, Argelia).
3.	Ainouche y Smati (2002)	Optimización de cadena Parcial de Cadena de Suministro. Componente <i>upstream</i> (desde producción hasta planta de licuefacción).	Modelo estocástico utilizando técnicas MINLP (<i>mix integer non-linear programming</i>).	Producción de gas en Hassi R'mel (Argelia) y planta de licuefacción / una terminal de exportación (Skidda, Argelia).
4.	Ainouche (2003)	Optimización de cadena Parcial de Cadena de Suministro. Componente <i>upstream</i> (desde producción hasta planta de licuefacción).	Modelo estocástico utilizando técnicas MINLP (<i>mix integer non-linear programming</i>).	Producción de gas en Hassi R'mel (Argelia) y planta de licuefacción / una terminal de exportación (Skidda, Argelia).
5.	Ainouche (2004)	Optimización de cadena Parcial de Cadena de Suministro. Componente <i>upstream</i> (desde producción hasta planta de licuefacción).	Modelo estocástico utilizando técnicas MINLP (<i>mix integer nonlinear programming</i>) y funciones gráficas tipo "arc-flow".	Producción de gas en Hassi R'mel (Argelia) y dos plantas de licuefacción / terminales de exportación (Skidda y Arzew, Argelia).
6.	Stchedroff y Cheng (2003)	Optimización global de la Cadena de Suministro de gas y GNL (desde producción hasta consumo).	Utilización de WITNESS ©.	Cadena de suministro Shell.
7.	Dahl (2007)	Optimización global de la Cadena de Suministro de gas y GNL (desde producción hasta consumo).	Sin datos disponibles.	Sin datos disponibles.

Nº	Autor	Problema	Algoritmo / Software	Base Experimental
8.	Tomasgard <i>et al.</i> (2007)	Optimización de cadena Parcial de Cadena de Suministro. Componente <i>downstream</i> (desde planta de regasificación hasta consumo).	Sin datos disponibles.	Planta de regasificación / terminal de descarga de Zeebrugge (Bélgica).
9.	Özelkana <i>et al.</i> (2008)	Optimización de cadena Parcial de Cadena de Suministro. Componente <i>upstream</i> (desde producción hasta planta de licuefacción).	MIP (mix integer programming).	Terminal <i>Cove Point LNG Terminal</i> en Maryland (Estados Unidos).
10.	Foss y Halvorsen (2009)	Optimización del funcionamiento de una planta de licuefacción / terminal de carga integrando GNL, LPG y condensados.	Sin datos disponibles.	Terminal Snøhvit (Noruega).
11.	Grønhaug y Christiansen (2009) y Grønhaug <i>et al.</i> (2010)	Optimización de la cadena de suministro del GNL en su componente <i>midstream</i> (excluido producción aguas arriba y consumos aguas abajo).	Modelos de tipo gráfico “ <i>arc-flow</i> ” y “ <i>path-flow</i> ”.	Compañía <i>midstream</i> (sin ofrecer datos).
12.	Andersson <i>et al.</i> (2010)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>).	MIP (mix integer programming).	Sin datos disponibles.
13.	Halvorsen-Weare y Fagerholt (2010)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) con restricciones de capacidad de almacenamiento y disponibilidad de atraques.	Sin datos disponibles.	Sin datos disponibles.
14.	Andersson <i>et al.</i> (2010)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>).	MIP (mix integer programming).	Sin datos disponibles.
15.	Fodstad <i>et al.</i> (2010)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) combinado con comercialización e incertidumbre de precios.	Modelos de tipo gráfico “ <i>arc-flow</i> ” utilizando MIP (mix integer programming) Modelo MOSEL con optimizador Xpress-MP Interfaces gráficas realizadas con C++ y C#.	Sin datos disponibles.
16.	Cen (2011)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) combinado con	Modelo estocástico MIP (mix integer programming).	Compañía multinacional con activos en producción / licuefacción y diferentes mercados

Nº	Autor	Problema	Algoritmo / Software	Base Experimental
		comercialización e incertidumbre de precios.	Evaluación de riesgos mediante <i>Conditional Value at Risk</i> (CVaR).	finales (sin aportar datos).
17.	Rakke <i>et al.</i> (2011)	Programación Anual de Cargas en planta de licuefacción. Generación de ADP (<i>Annual Delivery Program</i>).	Modelo estocástico MIP (<i>mix integer programming</i>) Procedimiento RHH (rolling horizon heuristic).	Operador de una planta de licuefacción (Sin aportar datos).
18.	Lai <i>et al.</i> (2011)	Capacidad de Almacenamiento de una terminal de descarga / Regasificación integrando en el modelo capacidad de transporte marítimo e incertidumbre de precios.	Sin datos disponibles.	Terminal de Regasificación (sin aportar datos).
19.	Emanuelson y Thordvalsen (2012)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) combinado con comercialización e incertidumbre de precios.	MIP (mix-integer programming) con procedimientos gráficos del tipo “arc-flow”, “path-flow”, “duty flow formulation”.	Sin datos disponibles.
20.	Erichsen y Røstad (2012)	Optimización parcial de Cadena de Suministro. Componente <i>upstream</i> (desde producción hasta planta de licuefacción).	Modelo estocástico multi-estado MIP (<i>mix-integer programming</i>).	Operación de una planta de licuefacción flotante (FLNG) en campos de norte de Europa (Noruega).
21.	Reddaa <i>et al.</i> (2012)	Optimización global de Cadena de Suministro. Componente <i>upstream - midstream - downstream</i> (desde producción hasta consumo).	Sin datos disponibles.	Plantas de licuefacción de Qatar (Ras Laffan) y comercialización global de GNL por Shell.
22.	Jaswar <i>et al.</i> (2012)	Optimización de Flota y planificación del transporte de GNL en operación circular (<i>rounded-shape Routing and Scheduling Problem</i>).	Modelización en Witness © Optimización <i>ad hoc</i> programada en Visual Basic Generación de Escenarios mediante técnica “ <i>what if</i> ”.	Transporte de GNL desde Indonesia a una FRSU (<i>Floating Regasification and Storage Unit</i>) en Osaka (Japón).
23.	Werner <i>et al.</i> (2012)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) combinado con comercialización e incertidumbre de precios.	Algoritmo estocástico multi-estado de naturaleza MIP (<i>Mixed Integer Programming</i>).	Sin datos disponibles.

Nº	Autor	Problema	Algoritmo / Software	Base Experimental
24.	Cho <i>et al.</i> (2014)	Optimización de Flota y planificación del transporte de GNL (<i>Routing and Scheduling Problem</i>) con introducción de Boil-Off Gas (BOG) en componente estocástica.	Modelo determinista de programación (<i>scheduling</i>) del tipo múltiple VRP (<i>multiple vehicle routing problem</i>) + extensión estocástica para BOG Escrutinio de resultados mediante métodos EVPI (expected value of perfect information) y VSS (value of stochastic solution) Generación de escenarios de simulación mediante método Montecarlo.	Plantas de licuefacción de Qatar (Ras Laffan) y comercialización propia global de GNL en 5 terminales de regasificación.
25.	Bittantea <i>et al.</i> (2015)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>).	Algoritmo MILP (mixed integer linear programming).	Suministro de GNL en islas del mar del Caribe. Modelo inter-terminal (con varios puntos de carga y varios puntos de descarga).
26.	Moraes y Faria (2016)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) combinado comercialización del gas y posible re-exportación con incertidumbre de precios.	Algoritmo estocástico MILP (mixed linear integer programming) Escrutinio de resultados mediante métodos EVPI (expected value of perfect information) y VSS (value of stochastic solution).	Compras de gas de la compañía Petrobras (Brasil) con tres terminales de regasificación (Pecém, Guanabara y Salvador).
27.	Benoist <i>et al.</i> (2016)	Optimización de Inventarios y planificación del transporte de GNL (<i>Inventory and Scheduling Problem</i>) combinado con comercialización e incertidumbre de precios a largo plazo (20 años) y considerando desglose de costes (fijos y variables).	Aplicaciones tipo <i>LocalServer</i> (Sin datos sobre el desarrollo matemático o software comercial utilizado).	Gestión de Aprovisionamiento de la <i>Utility</i> ENGIE (Francia).

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2.3.2 Descripción cronológica de los estudios de simulación sobre la cadena del GNL

Kuwahara *et al.* (2000) centraron sus investigaciones sobre la cadena logística del GNL con técnicas de simulación en Pará (Brasil). El objetivo era estudiar el GNL como posible fuente de

generación eléctrica en centrales de ciclo combinado de la región. Desde el punto de vista técnico los autores desarrollaron un modelo en ambiente no lineal que progresivamente van linealizando para resolverlo llegando a conclusiones sobre la flota y suministro óptimo en esta región.

Poco más tarde son presentados los estudios de Abdelhakim Ainouche en solitario o con colegas (en este caso los estudios se ciñen a muestras experimentales en relación a la cadena de suministro de gas realizada por la empresa estatal Sonatrach en Argelia desde los pozos de producción en Hassi R'mel hasta las terminales portuarias de GNL donde se sitúan los trenes de licuefacción: Skikda (primeros estudios) y Skikda y Arzew (evolución del modelo).

Ainouche *et al.* (2002) y Ainouche y Smati (2002) describen como la cadena de suministro de GNL es una gran consumidora energética, indicando que en el caso del suministro desde Argelia puede llegar en media a consumir el 15% del material transportado desde el origen de la cadena pero pudiendo alcanzar picos de hasta el 30%. Desde esta perspectiva, la reducción de costes de consumo vía optimización de la cadena es, por sí mismo, una justificación suficiente para implantar modelos de simulación que ayuden a dicho objetivo. Definen los autores un sistema global integrado que dividen a su vez en subsistemas donde están representados todos los eslabones de la cadena (tuberías de alimentación desde los pozos de extracción, plantas de licuefacción y tanques de almacenamiento en puerto de origen, buques para el transporte, tanques de almacenamiento y unidades de regasificación en destino, posibles almacenamientos subterráneos intermedios, estaciones de compresión, tuberías de distribución hasta clientes finales,...) y en los que se tienen también en consideración los parámetros de disponibilidad y fiabilidad de los elementos industriales principales (trenes de licuefacción y estaciones de compresión) que son un elemento más del modelo global.

Ainouche y Smati (2002) y Ainouche (2003) inciden no sólo en el coste asociado al consumo interno de gas dentro de la cadena sino los cambios de tendencias en el sector. Los contratos de GNL estaban originalmente basados en suministros de largo plazo en bases de “*take or pay*”, que conectaban un origen y un destino. Este clásico modelo estaba migrando hacia una mayor flexibilidad contractual y al incremento de transacciones en el mercado *spot* (de corto o medio plazo), donde los destinos son más variables. Estos estudios justifican también la implantación de modelos de simulación con el objetivo de reducir costes y lograr una optimización global. Incluyen, como en los trabajos anteriores, todos los elementos de la cadena dentro del modelo.

Técnicamente el modelo utilizado por estos autores es una adaptación *ad hoc* del modelo estocástico ARMA (*auto-regressive moving average model*), implementando una simulación del conjunto puerto/tanques de almacenamiento, y teniendo en cuenta factores de disponibilidad de plantas de licuefacción y estaciones de compresión. Para este último aspecto desarrollan un modelo de optimización de las tuberías, de naturaleza dinámica, utilizando técnicas MINLP (*mix integer nonlinear programming*).

Ainouche (2004) amplía los estudios anteriores utilizando como técnica la teoría de grafos e incluyendo una configuración más compleja en la que no sólo se evalúa un puerto (terminal de Skikda) sino dos (añade al anterior la terminal de Arzew), analizando otras posibles alternativas de inversión (nuevos trenes de licuefacción, almacenamientos subterráneos o en tanque, etc.) como respuesta a la demanda prevista de este producto, la magnitud de las inversiones que se requieren para atenderla y la necesidad de optimizarlas desde un punto de vista de eficiencia de costes. En este estudio, el autor indica que dado que el número de variables a considerar sobre los primeros modelos se ha multiplicado, es necesario introducir nuevas técnicas que sean abordables y sencillas y, en este caso, proponen la teoría de grafos (que aplican en variantes de flujo máximo y de flujo máximo con mínimo coste).

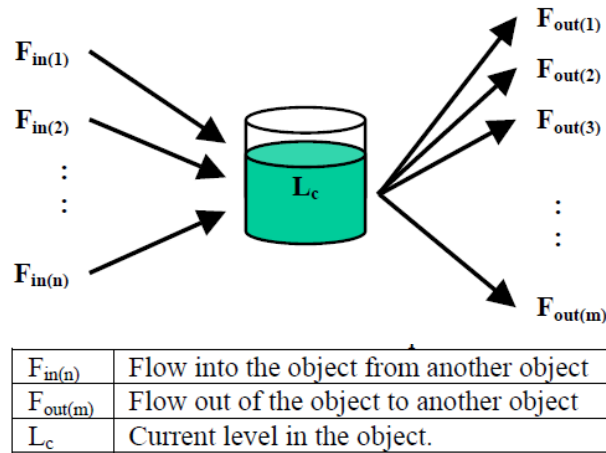
Estos autores definen una función del tipo *graph* $G = [X, U]$ donde “X” son los “nodos” del sistema (el número de nodos determina el orden del grafo) y “U” son los vínculos que establecen entre sí los nodos (denominados “arcos”) y que están sometidos a condiciones de contorno con un valor más bajo posible (usualmente cero) y un límite superior que determina la capacidad o máximo flujo que puede pasar a través del arco. El procedimiento de modelización se establece en dos fases: en la primera, se define gráficamente el sistema describiendo los nodos y arcos y, en la segunda, se definen las matrices que establecen las diferentes relaciones entre los elementos de las que los autores proporcionan una descripción matemática relativamente completa.

Si bien estos autores modelizan el sistema y lo dejan formulado desde el punto de vista matemático con ecuaciones de resultados tanto para los ratios de utilización de activos y su fiabilidad, como en lo que respecta a procedimientos para la detección de cuellos de botella; los mismos no ofrecen resultados prácticos concretos que puedan ser evaluados, ni datos sobre los procesos de calibración del sistema.

Stchedroff y Cheng (2003) trabajan con la modelización mediante paradigma DES en el campo del GNL, analizando de una manera global toda la cadena logística desde los pozos de producción pasando por la carga de este producto en los puertos donde se sitúan las plantas de licuefacción hasta los puntos de consumo y su paso por las terminales de regasificación en los puertos donde el producto es descargado. Estos autores ofrecen una comprensiva descripción de la cadena logística de este producto.

En la ilustración 216 se representa el modelo de estos autores que es, matemáticamente, muy simple, dividiéndose toda la cadena en diferentes elementos básicos (tanques de almacenamiento, buques, tuberías, etc.), y en el que cada uno de ellos se representa en cada momento por la cantidad de material que tiene en inventario (representado como L_c) y el sumatorio de la cantidad de material que entra en el mismo (representado como $F_{in(n)}$) menos el que sale (representado como $F_{out(m)}$).

Ilustración 216. Representación gráfica de elementos básicos.



Fuente: Stchedroff y Cheng (2003).

Los autores, en este artículo, se limitan a presentar las ecuaciones matemáticas del modelo (que desarrollan para la empresa Shell basándose en versiones anteriores desarrolladas por estos autores y que se apoyan en el software comercial Witness®). El modelo lo describen en tres fases. Sin embargo, no proporcionan ni resultados concretos ni un caso experimental de contraste, pero, resulta de interés por la comprensiva descripción de la cadena que proporcionan.

Dahl (2007) en su investigación titulada “*Optimización de la cadena de valor del GNL*”, sigue con este mismo problema, si bien no se ha podido tener acceso a los resultados de este trabajo del que se conoce su existencia porque viene citado como referencia bibliográfica en Foss y Halvorsen (2009) que luego se describirá.

Tomasgard *et al.* (2007) realizan una investigación sobre la cadena de valor del gas natural en la que interviene un elemento más que es la terminal de recepción de Zeebrugge (Bélgica). En Zeebrugge se sitúa una de las plantas de regasificación más importantes del centro de Europa y en la que el papel de los almacenamientos (en puerto o subterráneo) es un elemento básico. Estos autores tienen en consideración no sólo la logística propiamente dicha (incluyendo los activos de producción, transporte, procesamiento o distribución), sino, también, los propios contratos de aprovisionamiento (largo plazo o *spot*) y los mercados. Presentan un modelo desde la perspectiva de una compañía *upstream* en la que tratan de optimizar un portfolio mediante técnicas estocásticas en un ambiente de un mercado liberalizado.

Özelkana *et al.* (2008) estudian un modelo similar a los anteriores desde sus características técnicas (utilización de técnicas MIP), y analizan ciertos parámetros críticos para el diseño de una terminal de GNL y su impacto en la rentabilidad de un proyecto de inversión concreto que aplican a la terminal *Cove Point LNG Terminal* en Maryland (EEUU), en un contexto en el que los (en ese momento) contemporáneos desarrollos de *Shale Gas* en Estados Unidos hacían prever (como

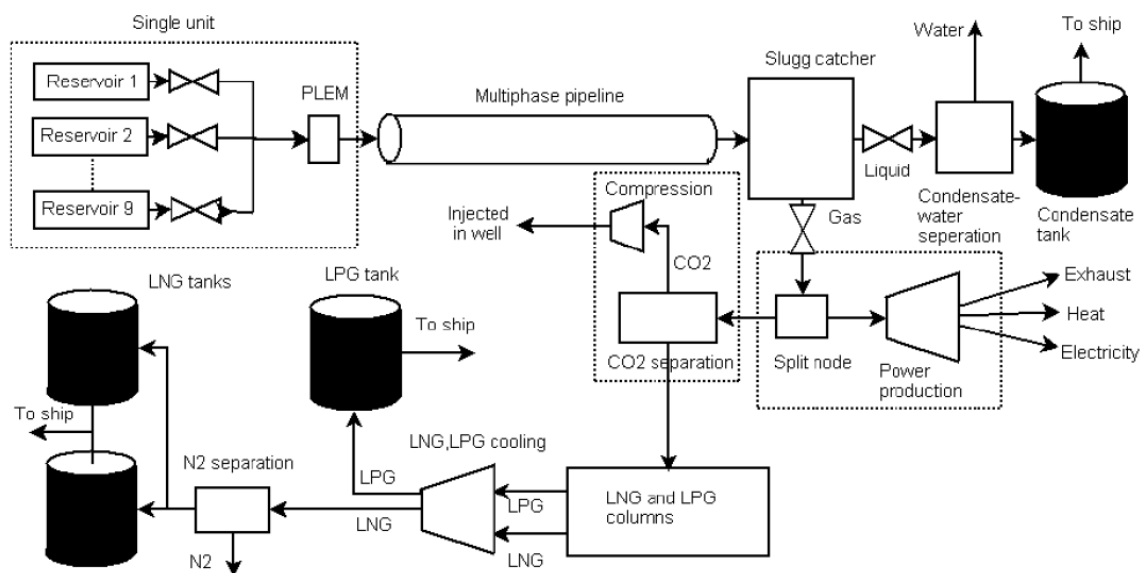
ha pasado) la transformación de este país de un importador de GNL a exportador de este producto (incluyendo transformaciones de plantas de regasificación en terminales de licuefacción). Se tienen en cuenta consideraciones de diseño como la capacidad de almacenamiento, capacidad de transporte de los buques o capacidad de producción de los trenes de licuefacción.

Foss y Halvorsen (2009) centran sus estudios en plantas de licuefacción con el objetivo de encontrar estrategias de operación óptimas. Indican, sin embargo, que es muy necesario tener en consideración tanto la logística marítima (barcos de GNL) como el propio suministro a la planta (desde los pozos), pues, de otro modo, no se puede tener una evaluación global y un modo de respuesta de la planta que se ajuste a la realidad. Como elemento novedoso en el modelo incluyen no sólo el propio GNL producido en los trenes sino también el LPG (acrónimo de *Liquefied Petroleum Gas*) y los condensados³²¹ que se producen en el proceso de licuefacción y que, usualmente, son también un tráfico susceptible de comercialización por vía marítima o terrestre (en algunos casos en función de la composición del gas de origen con un alto valor y en gran volumen) (ilustración 217).

El modelo planteado por estos autores es estocástico y no lineal en el que algunas de las variables del sistema son deterministas y otras de naturaleza estocástica. El experimento muestral utilizado es la planta de Snøhvit (Noruega), planta en la que se plantean, además, retos tecnológicos muy relevantes en el sector por estar situada en una localización muy septentrional. En suma, los autores generan una herramienta que permite tener un modelo de respuesta de la planta y su terminal portuaria ante la aparición de determinados eventos como los de retraso de los buques y los de interrupción de producción en alguno de los pozos que alimentan el complejo (y con ello disminución del ratio de suministro a la planta o factor de carga), que requieran de un ajuste de la planificación de la producción.

³²¹ Los condensados son subproductos que se obtienen al remover los hidrocarburos más pesados del gas natural en el proceso de licuefacción evitando que los mismos se congelen a una temperatura inferior colapsando la planta.

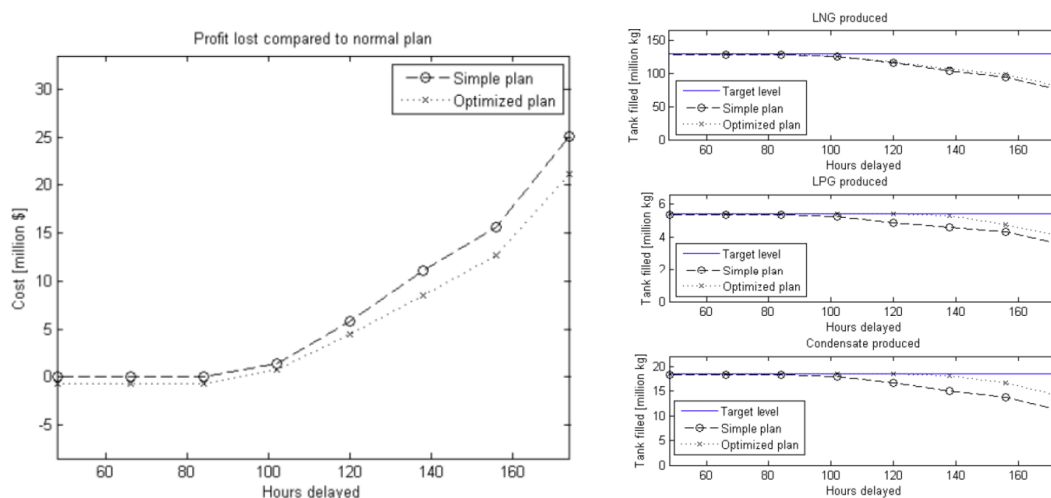
Ilustración 217. Esquema de funcionamiento de la planta de Snøhvit según Dahl (2007).



Fuente: Foss y Halvorsen (2009).

Como ejemplo de sus investigaciones se puede mencionar como evalúan los costes de retraso en la llegada de un barco sobre el programa inicialmente ideado de llegadas constantes (tiempo entre llegadas de 120 horas). En función de las horas de retraso, estos investigadores analizan los costes totales en un escenario en el que ninguna acción es tomada (denominado “*simple plan*” en ilustración 218) frente a otro escenario en el que la producción es ajustada a este evento (denominado “*optimized plan*” en la misma gráfica).

Ilustración 218. Costes incurridos y cambios en la producción producidos por el retraso de un barco en la planta de Snøhvit.



Costes incurridos (imagen izquierda) y cambios en la producción (derecha)

Fuente: Foss y Halvorsen (2009).

Grønhaug y Christiansen (2009) y más tarde Grønhaug *et al.* (2010) investigan la optimización de la cadena de suministro del GNL en un caso real que mencionan, pero, que no describen ni dan detalles (más allá de que se ha realizado en colaboración con una empresa envuelta en la parte *midstream* de la cadena, es decir, presente en las partes intermedias, excluidas las de exploración y producción de gas y la distribución y comercialización del mismo en clientes finales). Desde el punto de vista computacional desarrollan modelos de teoría de grafos en sus variantes “*arc-flow*” y “*path-flow*” que comparan para concluir que, dada la gran complejidad de este problema, solo en los casos más simples estas técnicas son capaces de resolver de manera óptima el sistema. En el primer procedimiento (“*arc-flow*”) los obstáculos se presentan en términos de tiempo de computación, mientras que en los segundos (“*path-flow*”) los problemas se ponen de manifiesto en términos de capacidad/memoria en cuanto los horizontes de planificación son largos.

Halvorsen-Weare y Fagerholt (2010) investigan el problema de enrutamiento y programación de buques de GNL, introduciendo en este caso restricciones en lo que se refiere al nivel de inventarios (*stocks* en tanques) y ocupación de muelles. Técnicamente estos autores desacoplan un problema conjunto (rutas + programación) y lo pasan a abordar dicotómicamente para permitir un tratamiento matemático más fácil. En lo que se refiere a las rutas a seguir el problema consiste en definir qué barco es asignado a cada cargamento producido en origen y con qué secuencia específica. El problema de programación trata de resolver cuándo debe agendarse una operación concreta teniendo en cuenta el estado de los inventarios y las limitaciones de disponibilidad de atraque. El modelo se aplica con éxito a test experimentales concretos que se basan en datos reales de operación.

Andersson *et al.* (2010) incluyen como capítulo de un libro el problema de resolución conjunta de la planificación global del transporte y la gestión de inventarios en la cadena de GNL. Técnicamente el modelo que presentan es similar al de Halvorsen-Weare y Fagerholt (2010): descomposición en dos submodelos, uno de enrutamiento y otro de programación, ambos basados en una formulación de tipo MIP. Los autores indican que es de aplicación a una empresa verticalmente integrada que tenga presencia en diferentes eslabones de la cadena de valor del GNL.

Estas dos últimas aplicaciones prácticas al mundo de GNL que se acaban de mencionar son continuación a los trabajos de los mismos autores, junto con Marielle Christiansen y otros colegas del mismo grupo de investigación³²². Estos son: Hooghiemstra *et al.* (1999); Flatberg *et al.* (2000), Fagerholt (2004), Christiansen *et al.* (2004), Fagerholt y Lindstad (2007), Christiansen *et al.* (2007), Andersson *et al.* (2008), Christiansen y Fagerholt (2008), Christiansen *et al.* (2009, 2011, 2013), Korsvik *et al.* (2009 y 2010), Korsvik y Fagerholt (2010), Hennig *et al.* (2012) y Agra *et al.* (2012, 2013, 2014 y 2016).

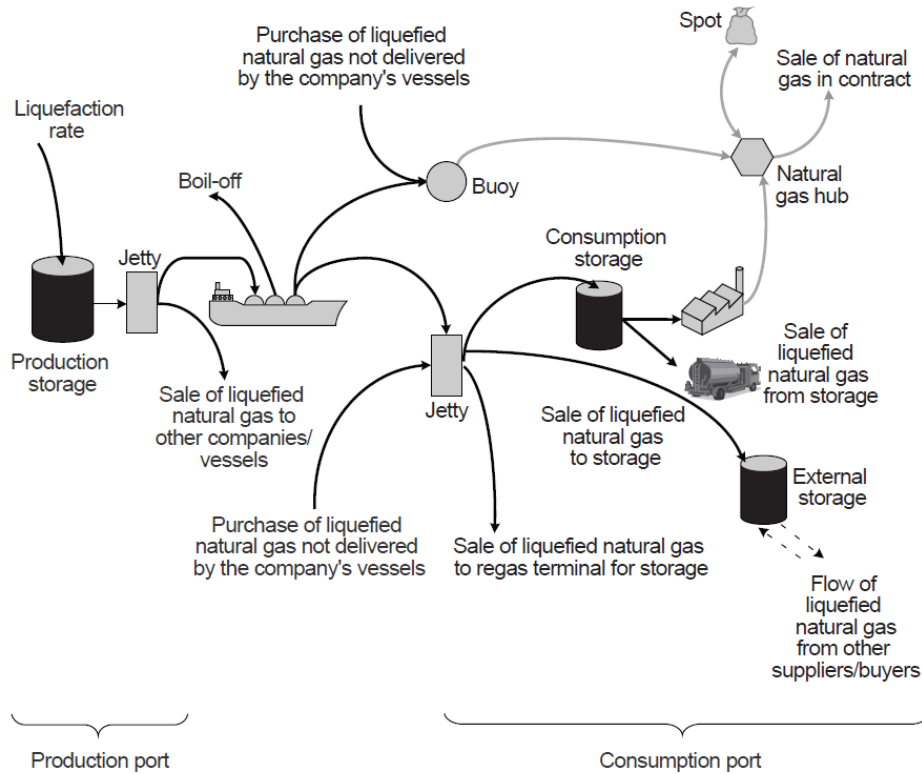
Todos estos trabajos están enmarcados en una línea principal de investigación que se refiere específicamente a la combinación de problemas de enrutamiento (*routing*), con programación de medios marítimos (*scheduling*), y gestión de inventarios (*inventory management*). Otros autores que han tratado este tema fuera de este grupo de investigación son Hwang (2005), Al-Khayyal y Hwang (2007) y Song y Fuman (2013). A este problema se le conoce usualmente en la literatura científica bajo los acrónimos de IRP (*inventory & routing problem*) o RSP (*routing and scheduling problem*) como ya se ha visto.

Fodstad *et al.* (2010) bautizan un programa de simulación bajo el nombre de “LNGScheduler” e indican cómo el mismo es capaz de integrar las funciones de control de inventarios (y por tanto gestión de la producción), *routing* (y, por tanto, transporte del material) y comercialización del mismo. Este tipo de enfoque venía siendo y se consolidará más tarde como una herramienta válida para la toma de decisiones no sólo desde el punto de vista operativo sino también comercial. El modelo trata de maximizar el beneficio utilizando datos de diferentes contratos de aprovisionamiento, variaciones estacionales de precios, diferenciales de precio entre diferentes mercados y flexibilidades de almacenamiento y suministro de la cadena; y es la respuesta informática a los requerimientos de nuevos actores logísticos en estos mercados que han tomado una importante cuota de mercado (empresas agregadoras o casas de *trading*) complementando a los clásicos productores (*oil & gas companies*) o a los grandes consumidores finales (*utilities*),

³²² Integrantes del Departamento de Economía Industrial y Tecnología de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Noruega (*Norwegian University of Science and Technology*).

que han decidido dar el paso de configurarse como empresas verticalmente integradas estando presentes en varios eslabones de la cadena de valor del gas (ilustración 219).

Ilustración 219. Cadena de valor del gas.

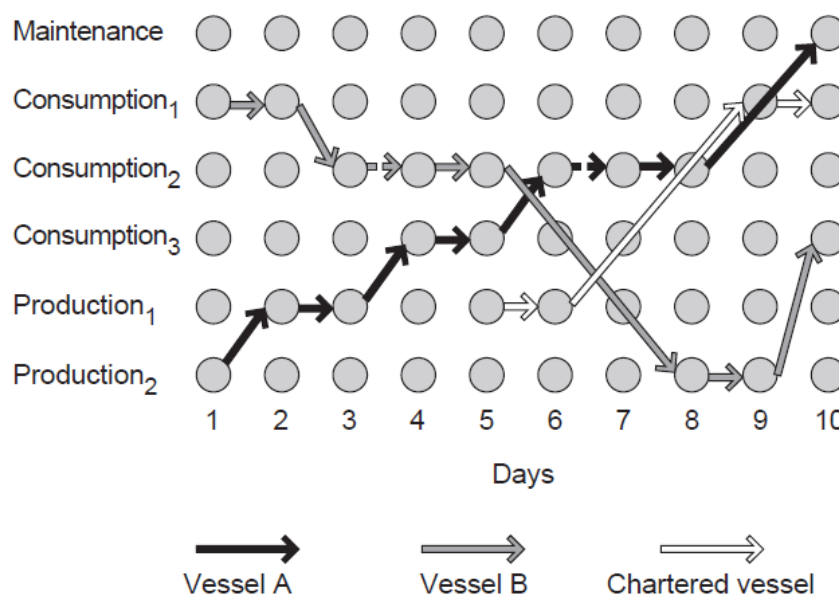


Fuente: Fodstad *et al.* (2010).

En la ilustración 220 los autores explican el proceso conceptual de enrutamiento. El modelo usado por los autores para representar la componente portuaria y el transporte marítimo es del tipo “*arc-flow*” con una descomposición granular en base diaria. Las trayectorias seguidas por cada barco son líneas que unen los nodos diarios. Un tramo horizontal quiere decir que el mismo se encuentra realizando una operación portuaria (bien de carga si el nodo-día se encuentra en un punto de producción, bien de descarga si el nodo-día se encuentra en un punto de consumo). Las líneas diagonales presentan desplazamientos o viajes de una localización/puerto a otro. Si el barco fondea esperando instrucciones (no tiene designado siguiente puerto de carga o descarga) el arco se interrumpe y el buque permanece inoperativo. El diagrama permite igualmente representar los periodos en los que los barcos están fuera de servicio por estar realizando tareas de mantenimiento. Estas técnicas de “*arc-flow*” habían sido ya utilizadas por Grønhaug y Christiansen (2009).

El modelo se implementó en MOSEL resolviéndose la optimización mediante el empleo de Xpress-MP (version 2008)³²³ alimentándose de una base de datos creada en Microsoft Acces. Estos autores también utilizan una interface gráfica de usuario desarrollada en C++ y C#.

Ilustración 220. Diagrama explicativo (modelo “arc-flow”) de la secuencia de enrutamiento de buques.



Fuente: Fodstad *et al.* (2010).

La tesis de Cen (2011) se centra en investigar la gestión de la flota de metaneros de la compañía francesa Total, uno de los agentes más relevantes en este sector. En este caso, siendo una gran compañía multinacional con activos en producción/licuefacción y diferentes mercados finales, el interés de esta compañía pasa por optimizar los costes de operación en su componente marítimo-portuaria, optimizando el uso de los buques, pero siempre llegando a cumplir sus compromisos contractuales y teniendo en cuenta el gran arbitraje internacional que en materias de precios regionales pueda establecerse en distintos mercados. En este sentido, la gestión del porfolio de aprovisionamiento y ventas de esta compañía es en realidad un modelo estocástico, de naturaleza dinámica y que se puede resolver mediante rutinas de programación de tipo “*integer optimization problem*”. En un primer capítulo, el autor describe conceptualmente el problema de gestión de esta cartera de aprovisionamiento y clientes y desarrolla el modelo matemático. En el segundo capítulo, discute la mejor manera de resolver el método matemático que ha descrito. Para ello

³²³ MOSEL (a veces referenciado en literatura científica como Xpress-MOSEL) es el lenguaje y ambiente de modelización desarrollado por la empresa Fair Isaac Corporation (FICO) quien comercializa también un optimizador conocido como Xpress-MP. Mediante estos paquetes se pueden resolver problemas de optimización y modelos utilizando tanto LP (*Linear Programming*) como MILP (*mix integer linear programming*), QP (*quadratic programming*) QCQP (*quadratically constrained quadratic programming*) y SOCP (*second-order cone programming*), permitiendo su conectividad mediante interfaces con otros software y lenguajes de programación tales como productos Microsoft Office o lenguajes como C++ y C#. Información sobre Xpress-MP puede recabase en Dash (1999), Dash (2000) y Guéret *et al.* (2005); mientras que para MOSEL puede acudirse a Dash (2002), FICO (2009) y FICO (2013).

propone la combinación de un método de cuantificación vectorial (como método de discretización) con otro de aproximación por programación dinámica proponiendo test experimentales que demuestran la convergencia del esquema numérico propuesto por el autor. En el capítulo tercero, realiza una evaluación de riesgos mediante el método “*Conditional Value at Risk*” (CVaR)³²⁴ ya que establece que el modelo que ha desarrollado para explicar el comportamiento del portfolio de aprovisionamiento es susceptible de un análisis mediante dichas técnicas. En el capítulo cuatro, realiza un estudio de sensibilidad de diferentes parámetros a los niveles de precio de mercado utilizando como herramienta el método numérico descrito en el teorema de Danskin³²⁵. También incluye en este capítulo una comparación de los resultados obtenidos mediante su modelo y otras formulaciones clásicas.

Rakke *et al.* (2011) centran su investigación en los aspectos más operativos relativos a este tráfico específico y en concreto en cómo los operadores de GNL realizan anualmente unos procedimientos de asignación de atraques y calendario de entregas que denominan usualmente ADP (*annual delivery program*), con los que pretenden optimizar la utilización de los barcos sin alterar el programa de producción del tren de licuefacción (mediante el conocimiento previo de las necesidades/obligaciones de retirada cada operador en determinada planta, los ritmos de producción y las paradas programadas para mantenimiento tanto de planta como de buques, etc.). Desde el punto de vista técnico, la formulación es del tipo MIP y dada la complejidad y tamaño del problema y el amplio horizonte de planificación (1 año) proponen un procedimiento que denominan RHH (*rolling horizon heuristic*), que en esencia actúa mediante la búsqueda de la solución final en base anual mediante la segmentación del problema en otros de orden inferior (sub-problemas) con horizontes temporales más cortos. El modelo se aplica a un escenario experimental concreto (no citan cual) indicando que los ADP's que genera el modelo se resuelven en un corto periodo de computación, y responden muy bien al problema conforme las indicaciones de los propietarios de la planta en base a experiencias previas.

³²⁴ Este método también conocido como *Expected shortfall* (ES) y a veces referenciado como *Average Value at Risk* (AVaR) o *expected tail loss* (ETL) surgió como alternativa a las deficiencias encontradas en los tradicionales métodos de evaluación del riesgo conocidos como Value-at-Risk (VaR). Este método fue descrito en Artzner *et al.* (1997) y más desarrollado un año después en Artzner *et al.* (1998) pudiendo encontrar una descripción comprensiva para un no experto en estos métodos matemáticos en Acerbi *et al.* (2001), Acerbi y Tasche (2001 y 2002). Ambos AVaR y VaR son métodos de medición de riesgo importados del campo de análisis financiero usados para evaluar los riesgos de mercado o riesgos crediticios de determinado portfolio de inversiones. El método define la pérdida a un nivel de confianza del “x” % como el retorno esperado en un portfolio de inversiones en los peores “x”% de los casos (escenarios). El método CVaR es más sensible que el VaR a la forma (y concretamente a las colas) de la función de distribución de pérdidas. El método matemático evalúa el valor del riesgo de una inversión de una manera conservativa prestando atención a aquellos resultados menos rentables (para altos niveles de “x” el método rechaza escenarios de alta rentabilidad pero escasa probabilidad mientras que para bajos niveles de “x” se centra en las peores pérdidas posibles. Usualmente, el nivel de referencia usado es x=5%).

³²⁵ Este teorema fue introducido por este autor en Danskin (1967) y se usa en aplicaciones de optimización para resolver problemas de máximos y mínimos. Técnicamente el teorema proporciona información sobre las derivadas de funciones del tipo $f(x) = \max_{z \in Z} \Phi(x, z)$, donde $z \in Z$.

Lai *et al.* (2011) se ocupan de optimizar la capacidad de almacenamiento en una terminal de recepción de GNL, problema que abordan teniendo en cuenta tanto las capacidades de transporte marítimo como la evolución de precios de dicho producto (para implementar un control de inventarios y ventas dentro del mercado *downstream*). La necesidad de esta optimización es muy relevante en una terminal de regasificación pues si bien en las terminales de licuefacción el coste viene determinado en gran parte por el equipamiento del propio tren de licuefacción, en las terminales de descarga las instalaciones de regasificación propiamente dichas (vaporizadores) son, relativamente y en términos unitarios, más baratas que los tanques de almacenamiento. En su estudio incorporan datos reales para calibrar el modelo, y una vez verificado contrastan diferentes estrategias y políticas de inventarios teniendo en cuenta el proceso estocástico que supone la disponibilidad de barcos para el transporte marítimo y la propia demanda de gas en el mercado finalista (afectada por precios y competitividad de este producto frente a otros sustitutivos, temperatura, swings estacionales o día/noche, etc.).

Emanuelson y Thordvalsen (2012) en su estudio aplican las mismas técnicas de Grønhaug y Christiansen (2009), es decir, modelos de teoría de grafos en *sus variantes* “*arc-flow*” y “*path-flow*”, con el objetivo de resolver el problema combinado de gestión de inventarios y gestión de flota de buques de GNL (problema que ellos bautizarían como IRP de *inventory and routing problem*). Estos autores añaden un nuevo sistema que denominan “*duty flow formulation*”, y fijan periodos de planificación más cortos (6-10 semanas) que en esencia corresponden a los periodos de reprogramación y ajustes de los mencionados ADP’s, frente a periodos anuales congruentes con los ADP’s implantados en este tipo de terminal.

Mientras el primer modelo (del tipo “*arc-flow*”) es una formulación que usa ciertas variables para representar todas las decisiones del modelo de manera explícita introduciendo cierta complejidad matemática y computacional en su resolución, el segundo modelo (del tipo “*path-flow*”) considera una única variable para representar un camino (“*path*”). Este segundo modelo incorpora un programa por cada barco (en el que se combinan las cantidades cargadas y descargas en cada puerto). Por último, un tercer modelo (del tipo “*duty flow*”) es chequeado por estos autores donde los caminos son remplazados o sustituidos por tareas (“*duties*”). Estas tareas son descritas como caminos parciales que cubren rutas sólo desde un puerto de carga a varios de descarga y vuelven al mismo punto de partida en el puerto de carga.

Desde el punto de vista computacional el modelo se resuelve mediante técnicas MIP y utilizando software comercial. Llegan a la conclusión de que el primer sistema (“*arc-flow*”) es capaz de encontrar óptimos en casi cualquier caso, pero a costa de más tiempo. Por el contrario, el segundo modelo (“*path-flow*”) siendo más rápido presenta en ocasiones problemas de memoria (más acusados cuanto más lejano es el horizonte de planificación) por el gran número de caminos que hay que generar en el proceso, que impiden encontrar soluciones al problema. Finalmente, concluyen que el proceso de flujo basado en tareas (“*duty-flow*”) es un buen compromiso entre tiempos de computación y capacidad de resolución de casi todos los casos ya que las tareas

(“*duties*”) son, significativamente, menos numerosas que los caminos (“*paths*”), resolviendo el obstáculo de capacidad.

Erichsen y Røstad (2012) se centran en las unidades flotantes de licuefacción (también conocidas como *floating LNG* o *FLNG* como ya se ha mencionado). En primer lugar, desarrollan un modelo determinista para evaluar y describir toda la cadena de valor del GNL, y en segundo lugar, ejecutan un modelo estocástico multi-estado en el que, como elementos de incertidumbre, se escogen el tamaño de las reservas y los precios de gas (los dos elementos críticos para determinar la rentabilidad de un proyecto de GNL). Desarrollan una herramienta de apoyo a la toma de decisión de inversión, y por tanto de naturaleza más estratégica que operativa, con el objetivo de “*maximizar los beneficios esperados descontados mediante un óptimo de inversión en infraestructura*”. Como elementos experimentales para verificar el modelo usan datos de campos del norte de Europa (concretamente de Noruega) y bases de datos de flota reales. El modelo da resultados empíricos de cuando una unidad de FLNG es mejor decisión que una instalación fija de licuefacción, aspecto en el que la distancia del campo a la costa es un elemento relevante (mayores distancias de transporte por tubería y problemas técnicos asociados) y en el que el coste unitario de estas unidades presenta en muchos casos un obstáculo de entrada mayor que la ventaja que introduce la posibilidad de traslado de la unidad de licuefacción de una localización a otra.

Reddaa *et al.* (2012) en sus investigaciones incorporan al cuerpo científico existente la experiencia práctica específica aportada por dos de los gigantes de la industria de GNL a nivel mundial, con la participación en su proyecto de Qatargas y Shell. La primera es la empresa estatal de Qatar responsable de los mayores proyectos de GNL en operación a la fecha (mega-trenes de Qatar en Ras Laffan y la introducción en el mercado de los buques de mayores dimensiones conocidos como Q_{flex} y Q_{max}). La segunda es una de las *oil major* con mayor presencia en el campo del gas natural y con actividades *upstream*, *midstream* y *downstream* en todo el planeta. Ambas compañías trabajan en un proyecto conjunto de planificación y optimización de la cadena de suministro. El modelo se implementa tanto para tomar decisiones de tipo operacional y táctico como para analizar riesgos, y responde a preguntas tales como la configuración óptima de la flota de buques (decisiones tácticas o estratégicas de inversión en nuevos activos de transporte) o requerimientos de velocidad en la gestión de tráficos (aspecto de naturaleza operacional y de vital importancia para garantizar el cumplimiento de ventanillas contractuales optimizando a su vez los consumos de los metaneros y minimizando el BOG).

Cho *et al.* (2014) en su investigación introducen un nuevo enfoque y presentan un avance con respecto a sus predecesores al considerar en su horizonte de planificación un marco temporal bienal en vez del clásico anual (o, incluso, menor que anual para evitar excesivos tiempos computacionales). Abordan así mismo el problema de optimización de rutas y programación de barcos (usualmente referenciado en literatura científica como “RSP” *de routing and scheduling problem*) pero enunciando explícitamente la repercusión del BOG de los buques, que modelizan mediante extensiones estocásticas y, por tanto, sometiendo este proceso a cierto nivel de incertidumbre.

Construyen un modelo que sirve a consumidores dispersos geográficamente y atendidos por una flota de buques heterogénea respondiendo con mayor realidad al *mercado spot* a partir de los años 2010. La motivación del estudio es la reciente coincidencia temporal para los autores de un mercado del que intentan capturar el cambio de tendencias (fundamentalmente, basculación de contratos a largo a contratos a más corto plazo y con menos suministros punto a punto; y aprovisionamientos y destinos más diversificados como corresponde a un *mercado spot*), pero, a su vez respondiendo al avance tecnológico que ha experimentado el sector (principalmente, en lo que se refiere a la tecnología de los buques). Técnicamente, en primer lugar, desarrollan un modelo determinista de programación (*scheduling*) del tipo múltiple VRP (*multiple vehicle routing problem*), en segundo lugar, consideran el BOG en un modelo de dos estados en el que el mismo es una función aleatoria.

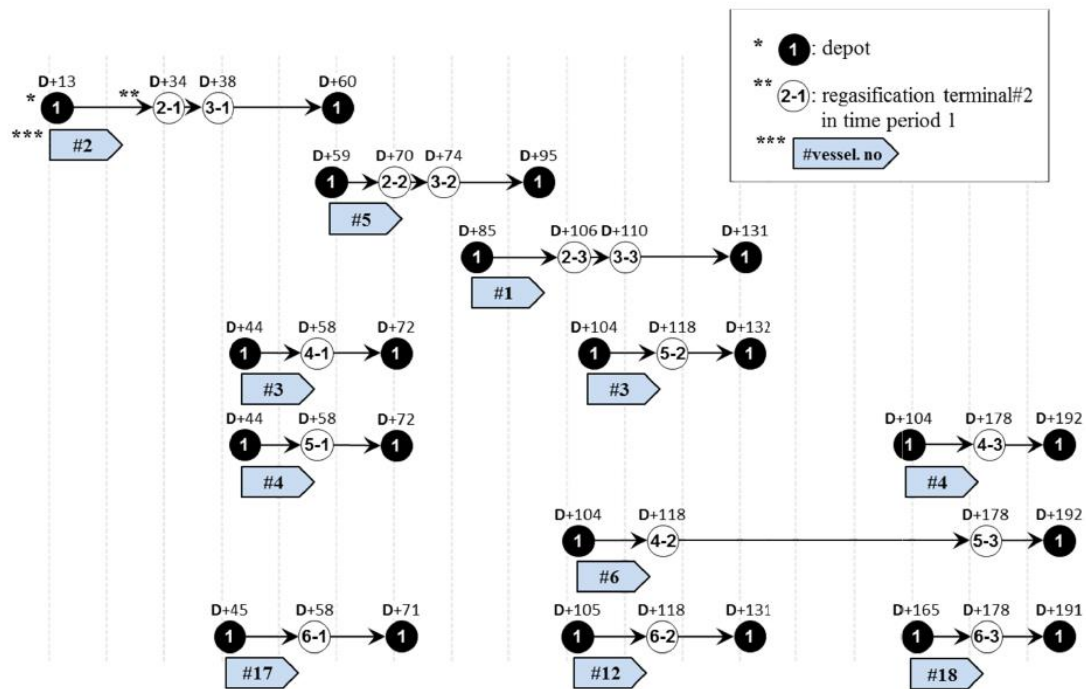
El modelo resultante presenta dificultades computacionales que resuelven ensamblando una rutina de optimización bajo método Montecarlo (para reducir el número de escenarios sin perjudicar la calidad de las soluciones). Los resultados obtenidos son sometidos al escrutinio de un método EVPI (*expected value of perfect information*)³²⁶ y VSS (*value of stochastic solution*)³²⁷. Como conclusión establecen que el modelo por ellos planteados ofrece unas soluciones más estables y mejores que el procedimiento determinista.

Como experimento muestral donde implementar el modelo (ilustración 221) los autores escogen el suministro desde Qatar hacia cinco de sus consumidores repartidos geográficamente en el globo (de los que no proporciona datos, pero, si una matriz de distancias entre sus distintas terminales que distan desde 533 hasta 11.141 millas náuticas y unos perfiles de demanda determinados y tiempos de suministro para satisfacerla), y, se considera un suministro de 2 años. Para este suministro utiliza un total de 18 barcos (de capacidades variables entre 140.000 m³ y 216.000 m³) a los que asigna también unos ratios diarios de fletamento oscilantes entre 175.000 y 200.000 dólares diarios).

³²⁶ El método EVPI (*expected value of perfect information*) es un procedimiento de estimación dentro del campo de la teoría de la decisión formulada por Mandanski (1960) y recogida en Raiffa y Schlaifer (1961). Este método trata de formular el precio que alguien estaría dispuesto a pagar para tener acceso a la información futura (100% correcta) que ahora precisa. En cualquier decisión existe un riesgo inherente a que la misma sea equivocada. El método trata de poner un valor al coste de esa incertidumbre pues eliminándola, se elimina la posibilidad de error, aunque sea desde el punto de vista teórico. Detalles de la formulación matemática puede encontrarse en Wikipedia EVPI (2016), en sus orígenes en Raiffa y Schlaifer (1961) en Birge (1982) o en el propio artículo de Cho *et al.* (2014).

³²⁷ VSS (*value of stochastic solution*) es definido por Birge (1982) como el beneficio potencial que se obtiene de evaluar un proceso mediante variables estocásticas / funciones de distribución en vez de con formulaciones deterministas en el que los “valores esperados” reemplazan a las “variables estocásticas”. En su artículo hace una comparación entre los VSS y los EVPI indicando como ambos son métodos de cuantificar diferentes fuentes de incertidumbre.

Ilustración 221. Ejemplo de resultados con el ship routing plan en un periodo de 192 días.

Fuente: Cho *et al.* (2014).

Jaswar *et al.* (2012) utilizan en sus estudios de optimización de las rutas circulares (rutas que siempre pasan por los mismos puntos desde un puerto de abastecimiento hasta otro de descarga) alimentando una unidad FRSU bajo un análisis de escenarios utilizando técnicas “*what if*”. Con este objetivo identifican los factores críticos (capacidad de almacenamiento, rendimiento de descarga, ratio de gasificación y número de buques de transporte) y se generan escenarios alternativos sobre los mismos (variando sus características). Resulta un interesante ejemplo portuario donde el acoplamiento optimizado de las descargas del buque metanero a la unidad FRSU (en realidad no deja de ser un transbordo) y desde la FRSU a tierra (capacidad de regasificación de la unidad) son determinantes. Técnicamente, construyen un modelo *ad hoc* usando el software comercial Witness© y realizan la optimización mediante Visual Basic. Como conclusión dan una recomendación de cuál es la configuración óptima del proyecto basada en rendimientos de producción de la FRSU³²⁸. Con ello se estima que la capacidad nominal de la instalación alcanza 8,01 Mtpa. El experimento se centra en un caso real de suministro desde Indonesia hasta una terminal en Osaka (Japón).

Werner *et al.* (2012) en su investigación presentan otro algoritmo estocástico multi-estado de naturaleza MIP para la gestión optimizada del portafolio de GNL desde una perspectiva estratégica.

³²⁸ Se trata de una unidad de 997 toneladas por hora de capacidad, alimentada con 7 metaneros de 93.900 m³ y con una capacidad de almacenamiento post-regasificación de 288.530 toneladas y un ritmo de descarga a FRSU de 7.940 toneladas por hora

Desde el punto de vista del suministro, el modelo contempla un portfolio diversificado, mientras que desde el punto de vista del mercado introduce incertidumbres de precio. Como novedad, al margen de las funciones estocásticas de precio o las características clásicas en cuanto al *timing* de los contratos, en este modelo se introducen decisiones de inversión y desinversión en barcos, tomando posiciones de fletamento sobre otros buques si las condiciones son más favorables; aspecto que también ha sido suscitado recientemente en la industria ante la caída de precios de este producto y la sobreoferta de buques (con caída de los costes diarios del flete por debajo incluso de los costes de operación de los mismos). Los autores inciden en cómo análisis de este tipo, basados en una perspectiva de portfolio, llevan a conclusiones diferentes que las que se obtendrían por tradicionales métodos de evaluación del valor presente neto de los proyectos, haciendo explícito cuánto afecta la incertidumbre (en este caso de precios) a las decisiones de contratación (de gas) o de inversiones (por ejemplo barcos para su transporte). Mediante estos modelos se consiguen mayores beneficios y un uso más eficiente de las capacidades.

Bittantea *et al.* (2015) estudian la optimización de la cadena de suministro de GNL. Se trata de un modelo similar a los anteriores con las características de centrar la atención en la respuesta inter-terminal, de tal manera que el modelo considera múltiples orígenes, con múltiples destinos y una flota heterogénea de gaseros. Conforme van avanzando las técnicas computacionales y con ello la velocidad de los equipos, problemas que, como éste, eran inabordables hace pocos años, son hoy resueltos con éxito y con suficiente efectividad (desde el punto de vista de consumo de tiempo). Este modelo responde además con más precisión al mercado actual de GNL, donde proyectos de suministro de punto a punto (basados en un contrato largo plazo que ligaba comprador y vendedor y con ello puerto de carga y descarga) han dado paso a contratos flexibles y a un mayor número de ventas en el *mercado spot*. Técnicamente utilizan un algoritmo MILP para re-encontrar la solución que minimiza los costes asociados al suministro de dicho combustible, siendo el modelo testado en el suministro de GNL en el Caribe.

Moraes y Faria (2016) realizan un interesante estudio práctico para asesorar a una compañía en el mejor portfolio de aprovisionamiento, optimizando sus compras de GNL entre los mercados de largo plazo y el *mercado spot*. Como punto de partida toman la demanda de esta compañía en un horizonte temporal dado. El modelo es de naturaleza estocástica tanto en lo que se refiere a los precios de GNL futuros como en lo que se refiere a la demanda real del producto (algo que coincide con la realidad del mercado cuya evolución de precios y volúmenes es, realmente, incierta incluso en periodos cortos). El modelo consigue realizar una minimización del coste global del aprovisionamiento considerando los stocks y la posibilidad de re-exportar los excedentes que en determinado momento puedan producirse buscando diferenciales de precio y arbitrajes internacionales en diferentes mercados.

Nuevamente utilizan una formulación MILP donde la función objetivo es maximizar el beneficio esperado por la compañía (como se ha comentado optimizando las compras y cuando existan excedentes aprovechando las mejores oportunidades de venta), y se apoyan en trabajos previos

de Zheng *et al.* (2010) en el campo de la producción de gas y suministro por tubería en diferentes mercados.

Estos autores utilizan como criterios de evaluación de resultados las técnicas EVPI (*expected value of perfect information*) y VSS (*value of stochastic solution*) que ya se han tratado al hablar de Cho *et al.* (2014).

El caso práctico analizado por estos autores son las compras de gas de la compañía brasileña Petrobras que, en los últimos años, se ha configurado como uno de los compradores de GNL más activo del mundo. En el modelo se introducen tres terminales de regasificación en Brasil (Pecém, Guanabara y Salvador) y modelizan un centenar de escenarios diferentes (en lo que se refiere a demanda y precios).

Benoist *et al.* (2016) analizan experiencias de modelización prácticas dentro de la *utility* francesa ENGIE. En su modelo tienen en consideración todos los eslabones de la cadena (como lo han hecho investigaciones ya citadas) con la diferencia que éstos, a la hora de introducir los costes de cada elemento diferencian entre los costes variables de operación y los costes fijos, en una aproximación más real a la forma de evaluar de las compañías energéticas. Sin dar datos sobre los proyectos evaluados, los autores indican que el modelo ha sido implantado con éxito por ENGIE para la evaluación de proyectos a largo plazo (20 años) y que han utilizado como tecnología aplicaciones tipo LocalSolver.

4.3.2.4 Conclusiones y futuros campos de investigación en la simulación y modelización de terminales de GNL.

El estudio de la cadena de suministro del GNL ha sido introducido en el campo de la investigación operativa en fechas muy recientes (todos los estudios han sido publicados a partir de los años 2000), presentando, por tanto, un potencial de desarrollo futuro muy elevado.

Los estudios analizados (27 en total) han estado centrados casi monotemáticamente en la resolución de problemas de inventarios, enrutamiento y programación de operaciones dentro de unas subclases de investigación operativa que viene denominándose IRP (*inventory routing problem*) y RSP (*routing & scheduling problem*).

Se puede concluir, además, que existen dos fases diferenciadas en los estudios: una primera, en la que el tema se abordaba exclusivamente desde el punto de vista logístico con el objetivo de optimizar la cadena de suministro, pero sin introducir como las operaciones se ven afectadas por los precios del producto (y sus dinámicas regionales o estacionales); y otra segunda fase, en la que el precio del GNL se toma como una variable más del problema para desarrollar programas que se ajusten más a las condiciones reales de mercado.

Estos estudios se podrían denominar *pricing and inventory & scheduling combined problem* (PISCP), y se desarrollan, generalmente, a partir del 2010, habiendo actuado como catalizadores el proceso por el cual el *mercado spot* gana terreno al de largo plazo, y el hecho de que cada vez existen más actores y países productores/receptores de GNL.

Existe, además, un amplio campo de estudios en relación a la cadena del GNL que todavía no ha suscitado un interés científico relevante. Se destacarían en primera instancia los siguientes siete campos de actuación, que presentan un claro potencial de desarrollo:

- Implantación de otros paradigmas de programación como el ABS o, sobre todo, el SD, más allá de la técnicas DES con formulaciones tipo MIP o MILP. Efectivamente, el gran nivel de abstracción que exige la introducción de la dinámica de precios en la cadena logística de GNL (sometidas a fuerte volatilidad por decisiones de índole geoestratégico, incertidumbres regulatorias, catástrofes naturales, etc.) le hacen en principio un buen candidato para ser estudiadas bajo el escrutinio de estos sistemas.
- Introducción, en el *inventory routing problem*, de un factor adicional de análisis como es el de las previsiones meteorológicas en horizontes de corto plazo. Para justificar este tipo de estudios conviene recordar como la generación eléctrica mediante gas natural suele responder a la dinámica de “*buffer*” del parque (cuando existe un recurso renovable disponible como el hidráulico, el viento o solar esta tecnología suele desplazar al gas que tiene un modelo de respuesta más flexible que el carbón o la nuclear). Así, primero habría que comprender como afectan diferentes condiciones meteorológicas a la demanda de GNL: picos de consumo que introducen las olas de frío o calor (que incrementan el consumo eléctrico para uso en calefacciones o aires acondicionados), periodos excesivamente secos o muy lluviosos (con variaciones de los stocks de agua embalsada y con ello de la potencial generación eléctrica mediante recurso hidráulico) o periodos excesivamente ventosos o con déficit de viento (afectando en este caso a la generación eléctrica mediante este recurso). Obviamente, en cada mercado la afección será más o menos acusada en función del propio mix energético por lo que los estudios tendrían que incorporar un análisis previo de esta característica.
- Introducción en el PISCP, como variable adicional, el cómo influye en la demanda del GNL la evolución de precios de productos sustitutivos, fundamentalmente el carbón. En efecto, como es sabido, el gas natural es una de las principales fuentes de producción de energía eléctrica pero, en determinadas condiciones de mercado, compite comercialmente con este producto.
- Combinación en determinados mercados específicos de las cadenas logísticas del GNL y del gas por tubería. Esta variante del PISCP tendría que tener en cuenta el *breakdown* de costes de cada uno de estos productos y como uno desplazaría al otro en función de la diferente

evolución de mercado. Esto es relevante en ciertos mercados que pueden abastecerse tanto por gas por tubería como por GNL, por ejemplo España.

- Políticas de respuesta de las compañías frente a ciertos eventos catastróficos o situaciones de emergencia. En concreto podrían ser interesantes aquellos que pudieran tener una fuerte repercusión en la cadena logística (más allá de los eventos ya estudiados por algunos autores como los retrasos en la llegada a puertos de buques metaneros o eventos inesperados en producción) como podrían ser el cierre del canal de Suez, la interrupción de tráficos en (o desde) ciertas regiones o actores relevantes por eventos de tipo geopolítico (bloques comerciales) o situaciones concretas de conflicto.
- Modelo de respuesta global del sistema ante nuevas oportunidades y retos del mercado tales como: i) la reciente inauguración de la ampliación del canal de Panamá (que permitirá según IGU (2016) el tránsito del 90% de la flota de metaneros y conectará de una manera más rápida las cuencas del Pacífico y del Atlántico); ii) la apertura de nuevas rutas marítimas en latitudes septentrionales por efecto del cambio climático y disponibilidad de gaseros clase “C” (rompehielos); iii) el reajuste de mercado cuando se produzca una masiva expiración de contratos de largo plazo firmados a finales de los años 90 y principios del 2000 (esperados en 2020-2025), y, iv) la entrada de nuevos volúmenes al mercado (exportaciones de Estados Unidos, nuevos super-proyectos de Australia, suministros desde Irán, etc.).
- Incorporación de nuevos nichos de mercado ya tratados por de la Peña y Canales (2012) como son los proyectos de pequeña escala (*LNG small scale*) o el suministro de GNL como bunker de buques comerciales (*LNG bunkering*) que obligará al diseño de nuevas cadenas logísticas.

4.3.3 Otros graneles líquidos

Como se ha visto en puntos precedentes, tanto los tráficos de crudo de petróleo y sus derivados (apartado 4.3.1) como el del GNL (apartado 4.3.2) han despertado cierto interés entre la comunidad científica, unos desde hace más de cincuenta años pero esencialmente centrado en los problemas de optimización de rutas (crudo) y otros desde fechas más recientes (año 2000 en adelante) pero en un conjunto más amplio de realizaciones.

Más difícil es encontrar otros ejemplos dentro del subsector de graneles líquidos. No obstante algunos autores se han aproximado a este campo desde un carácter generalista (aproximaciones teóricas al IRP en graneles líquidos sin especificar el tipo de producto) u otros tipos de tráficos específicos (amonía, aguas de sentinas, etc...). Entre los más relevantes se podría destacar:

Nemhauser y Yu (1972) abordan la programación óptima de un sistema de abastecimiento de graneles líquidos mediante técnicas de modelización utilizando técnicas DES, introduciendo un

algoritmo de programación dinámica y ofreciendo una solución de tipo analítica para un caso sencillo.

Bausch *et al.* (1998) desarrollan un modelo para la gestión de la logística marítima de múltiples graneles líquidos que son transportados en buques tanque y barcazas. Su enfoque es de pequeña escala centrándose su modelo en el transporte de cabotaje y su objetivo es proporcionar a la compañía para la que trabajan un DSS que pueda gestionar de una manera muy sencilla mediante hojas de cálculo que alimentan el verdadero modelo de optimización MIP. Esta empresa se enfrenta a un problema lingüístico (no todos los operadores utilizan el mismo idioma) que empuja a que los autores hagan un desarrollo gráfico basado en diagramas de Gantt (lenguaje visual fácil de asimilar por todos ellos). Trabajan sobre un horizonte temporal de corto plazo (2-3 semanas) en el que cada buque puede hacer varios viajes recalando en varios puertos.

Hooghiemstra *et al.* (1999) trabajan en el campo de graneles líquidos tratando de optimizar el transporte marítimo de una flota de buques transportando amonía entre los puertos de producción y consumo.

Este mismo producto (amonía) es considerado en el IRP resuelto en el modelo de Christiansen (1999). Se trata de un problema de optimización de rutas con ventanas de acceso a los atraques (el modelo cuenta con una flota de buques que realizan el transporte entre los puertos de producción y consumo). La cantidad transportada es función de los ratios de producción, las capacidades de almacenamiento y los niveles de *stocks* requeridos para asegurar la demanda del producto en los puertos de destino. El problema se resuelve mediante una descomposición Dantzig–Wolfe³²⁹ con dos subproblemas (rutas de los barcos y gestión del inventario/almacenamiento) aplicando algoritmos *branch-and-bound*. El modelo se desarrolla de una manera teórica pero se aplica a un caso real.

Flatberg (2000) tratan de resolver la programación de varios buques y la optimización de sus rutas en sus escalas en diferentes terminales de graneles líquidos. Implementan su modelo en C++ utilizando CPLEX (software de optimización desarrollado por IBM para resolver el MIP).

Dahal *et al.* (2001) estudian un caso muy particular en relación a la programación de la descarga de agua de sentinas de buques en una instalación dotada de un atraque y cuatro tanques de almacenamiento. Su enfoque matemático pasa por la construcción de un algoritmo genético

³²⁹ El método de descomposición Dantzig–Wolfe es un algoritmo presentado por George Dantzig and Philip Wolfe en 1960 e ideado para resolver problemas de programación lineal con una estructura espacial (Dantzig y Wolfe, 1960).

combinado con técnicas de resolución de sistemas basadas en reglas³³⁰ con los que se apoyan para resolver el problema complejo MIP-optimización de este caso experimental.

Ronen (2002) también aborda un ejercicio teórico en el ámbito de graneles líquidos (sin especificar ningún tráfico concreto) pero sobre las mismas bases que autores anteriores. Su artículo trata de resolver el problema de planificación de cargas de una terminal poli-producto de graneles líquidos de grandes dimensiones en las que existen restricciones de capacidad en el almacenamiento tanto en los puertos de origen como de destino. Ambos (origen y destino) son conectados mediante una flota de buques o barcas y el objetivo es encontrar el óptimo que impida la ruptura de la cadena (tanto parada de producción en origen como desabastecimiento aguas abajo). La técnica usada es MIP y se acopla un algoritmo heurístico basado en coste para asegurar que se obtienen soluciones rápidamente (en el caso de rutas muy largas el tiempo de resolución puede ser muy elevado).

Jetlund y Karami (2004) presentan un modelo de optimización de rutas del tipo IRP, basado en técnicas MILP y asociado al tráfico de productos químicos. En este caso los buques que someten a estudio son quimiqueros que transportan diferentes productos (graneles líquidos) en sus bodegas y que recalcan en puertos con longitudes de *slots* diferentes. Su modelo lo aplican a un caso práctico real en el que una gran empresa naviera especializada en estos tráficos opera con 10 quimiqueros que descargan en 36 puertos diferentes y realizan 79 operaciones asociadas a distintos tipos de materiales. Según los resultados que presentan, mediante este modelo de optimización de rutas logran ahorros operativos del 32%.

Hwang (2005) y más tarde Al-Khayyal y Hwang (2007) utilizan técnicas de simulación y modelización que recuerdan a los estudios de Flatberg (2000) pero esta vez en una red de suministro poliproducto (optimización de las rutas de varios buques inmersos en una red de suministro de varios graneles líquidos cargando y descargando en un sistema formado por varios puertos).

Gunnarsson *et al.* (2006) realizan un modelo matemático para optimizar la logística de distribución de pulpa de la empresa Södra Cell AB, cubriendo tanto la fase marítima como terrestre (camiones y trenes). Esta empresa produce pulpa desde recursos forestales en escandinavia y la distribuye por toda Europa. El suministro se realiza directamente desde sus molinos de producción a los clientes finales (empresas madereras, papeleras,...). El modelo es capaz de escoger el enrutamiento óptimo (de mínimo coste) considerando todos los modos de transporte y para ello utilizan nuevamente técnicas MIP aplicando software comercial para su

³³⁰ Conforme Wikipedia – SBR (2017), “los sistemas basados en reglas trabajan mediante la aplicación de reglas, comparación de resultados y aplicación de las nuevas reglas basadas en situación modificada. También pueden trabajar por inferencia lógica dirigida, bien empezando con una evidencia inicial en una determinada situación y dirigiéndose hacia la obtención de una solución, o bien con hipótesis sobre las posibles soluciones y volviendo hacia atrás para encontrar una evidencia existente (o una deducción de una evidencia existente) que apoye una hipótesis en particular”. En literatura científica estas técnicas suelen referenciarse como “*heuristic rule-based techniques*” (Dahal, 2001).

resolución. En fases iniciales, estos autores reportan como para rutas muy largas se encontraban problemas de resolución (en forma de tiempos de computación) que resuelven mediante simplificaciones heurísticas (tal y como había hecho Ronen, 2002) que según comentan encuentran soluciones óptimas en un tiempo razonable de computación (investigan cinco escenarios y concluyen que la desviación entre las rutas calculadas mediante estas simplificaciones y las que se obtendrían sin ellas es del orden del 0.12%).

Huang y Karimi (2006b) realizan un modelo de *transshipment* pero esta vez asociado a productos químicos en vez de crudo de petróleo. El modelo de estos autores es similar al presentado por ellos mismos en Huang y Karimi (2006a) para el caso del petróleo es decir, varios buques de mayores dimensiones transbordan su producto a varios barcos de menores dimensiones que, a su vez, sirven diferentes terminales de descarga final. A su vez, cada buque puede transportar diferentes tipos de mercancía ya que poseen tanques segregados por material. Desarrollan en total 9 modelos clasificados en tres tipos distintos, dos de los cuales permiten abordar problemas de gran escala al utilizar funciones de relajación que permiten dividir un horizonte de planificación largo en subtramos o periodos de planificación intermedio más cortos. Para simplificar algunos problemas de gran escala también utilizan hipótesis de agregación de cargas que reducen hasta en 2 órdenes de magnitud la longitud del problema.

Christiansen *et al.* (2011) presentan una aplicación práctica de resolución de IRP aplicada a la industria del cemento³³¹. Su artículo considera la logística de un gran grupo cementero que produce y suministra vía marítima diferentes tipos de cementos (no mezclables por su propia naturaleza) desde sus centros de producción hasta unos silos intermedios de distribución a lo largo de la costa de Noruega. Existen constricciones de almacenaje tanto en los centros de producción como en los silos de distribución intermedio. Cada uno de estos elementos de almacenamiento cuenta con límites inferiores (para atender con suficientes coeficientes de seguridad la demanda) como superiores (por la capacidad intrínseca de dichos almacenamientos). En el caso experimental que pretenden resolver estos autores se presentan problemas en periodos de consumo (el tamaño de la flota no es capaz de atender la demanda de producto). Los autores introducen otras constricciones que tienen que ver con el propio tamaño de los buques (calado y capacidad de sus bodegas). Desde el punto de vista técnico construyen un modelo que resuelven usando algoritmos genéticos.

Van Asperen *et al.* (2011) en un ejercicio más portuario que los que se han repasado últimamente, discuten reglas de prioridad de atraque mediante simulación, utilizando como contexto

³³¹ Una terminal de cemento como la descrita por estos autores debiera haber sido englobada conceptualmente dentro de graneles sólidos (grupo al que pertenece). Sin embargo se trata de un granel con ciertas características de operación (carga y descarga neumática desde buque a silos o camiones) que le hace conceptualmente y a los efectos de su modelización más parecido a los graneles líquidos. Por ello, y siendo conscientes de esta particularidad, a los efectos de esta tesis se ha preferido tratarlos como “otros graneles líquidos” e incluirlos en este apartado.

experimental los barcos de graneles líquidos que atracan en un *jetty*. Estos autores definen la llegada de los buques bajo ciertos parámetros (llegadas programadas pero irregulares, llegadas regulares, llegadas dependientes del nivel de *stocks* y llegadas aleatorias) ofreciendo conclusiones sobre las ventajas de imponer reglas de prioridad en la eficiencia de la terminal y retrasos inferidos a los buques por esperas.

4.4 Terminales Ro-Ro, de vehículos y pasajeros

4.4.1 Terminales Ro-Ro de mercancía.

Las terminales Ro-Ro son unas instalaciones portuarias que, sólo en fechas muy recientes, han atraído la atención de la comunidad científica que realiza sus labores de investigación en el área de OR. Efectivamente, las primeras realizaciones en este campo probablemente datan de mediados de la década de los 2000.

Como se verá a lo largo del presente epígrafe ese interés ha sido, además, muy limitado tanto en el número de trabajos (apenas se pueden citar una decena de publicaciones) como por la diversidad geográfica y comunidad científica involucrada. La práctica totalidad de realizaciones revisadas corresponden al mismo contexto geográfico (rampas Ro-Ro en Turquía) y realizadas por el mismo grupo de investigación (Escuela Politécnica de Estambul, Turquía).

Algunas de las características que complican el diseño de estas terminales son abordadas por Maksimavicius (2004) en su estudio de los elementos críticos de este tipo de instalaciones. Entre ellas, este autor destaca por su singularidad: la capacidad de los puestos de aduanas y otras inspecciones administrativas, de seguridad o para-aduaneras; puertas de entrada-salida de la terminal; áreas de espera y parking y la propia rampa de acceso de los vehículos al buque Ro-Ro. Estos autores proporcionan algunas herramientas analíticas (no utilizan modelización) que permiten llegar a un diseño óptimo de este tipo de terminales.

El primer autor que se introduce en la simulación en este tipo de terminales es Yildirim (2006) en su tesis para la obtención del título de Master en la Yıldız Technical University de Estambul (Turquía). Este autor analiza el caso de tres rampas Ro-Ro en Estambul (Turquía) y estudia tres posibles localizaciones (Ambarlı, Silivri y Kavaklı). Si bien se conoce la existencia de esta investigación por trabajos posteriores de otros autores de esta universidad que lo citan, no se ha podido realizar un análisis crítico de la misma por no haber podido tener acceso al texto. Sea como fuere, esté bien o mal formulado su modelo; o sea más o menos completo, debe citarse por ser, como se ha indicado, la primera referencia que se ha encontrado editada en este campo y para este tipo de instalaciones.

La Agencia Internacional de Cooperación Japonesa (JICA, 2007)³³² realiza un completo análisis de viabilidad para el desarrollo de un sistema de instalaciones Ro-Ro en Filipinas. No incluye ningún modelo de operación como los que aquí se están revisando, sin embargo, se cita porque aporta un interesante análisis del estado actual y necesidades de este tipo de tráfico incluyendo modelos de proyección de tráfico futuro así como modelos de evaluación financiera de las inversiones a realizar (mediante clásicos análisis de la TIR del proyecto) y de evaluación de la repercusión económica y social en el caso de llevarse a cabo el programa por ellos recomendado.

Yaran (2009) vuelve a realizar una tesis para la obtención del título de máster en la Universidad de Estambul (Turquía) en el que incluye un estudio de selección de alternativas para la ubicación de rampas Ro-Ro en la región del Mármara (Turquía). Nuevamente no se ha podido localizar este estudio pero por referencias de terceros autores (Özkan *et al.*, 2016) se sabe que utiliza un procedimiento analítico de redes para seleccionar la mejor ubicación donde establecer una línea Ro-Ro que una la costa de Tracia con la de Anatolia evitando entrar en el tráfico rodado de Estambul que sufre de *per sé* una alta congestión. Para estos autores, el diseño del área de espera y aparcamiento era crucial (tal y como apuntaba ya Maksimavicius, 2004) y proponía el diseño del espacio óptimo y la necesidad de realizar reservas de suelo para posibles expansiones futuras de la línea en respuesta a un futuro crecimiento de la demanda.

El impulso de las políticas de incentivación del tráfico marítimo de corta distancia (*short-sea-shipping* o SSS en literatura anglosajona) tanto desde la Unión Europea como de Estados Unidos desde comienzos de los años 2000 y como respuesta a la necesidad de descongestión de las carreteras y ferrocarriles y la contribución a mejoras ambientales por reducción de ruido y polución asociados a dichos tráfico son para Fusco *et al.* (2010) una razón de peso para prestar una mayor atención a este tipo de terminales.

Estos autores ponen de manifiesto como el transporte por carretera resulta una opción más flexible mientras que el transporte por ferrocarril o barco resulta (a partir de determinadas distancias y volúmenes) una opción más efectiva desde el punto de vista del coste y del medio ambiente (menos contaminante). Sin embargo, para promover el traspaso al modo de transporte marítimo es necesario diseñar terminales Ro-Ro eficientes, baratas, con alto grado de fiabilidad (sin interrupciones operativas) y disponibilidad de servicios frecuentes.

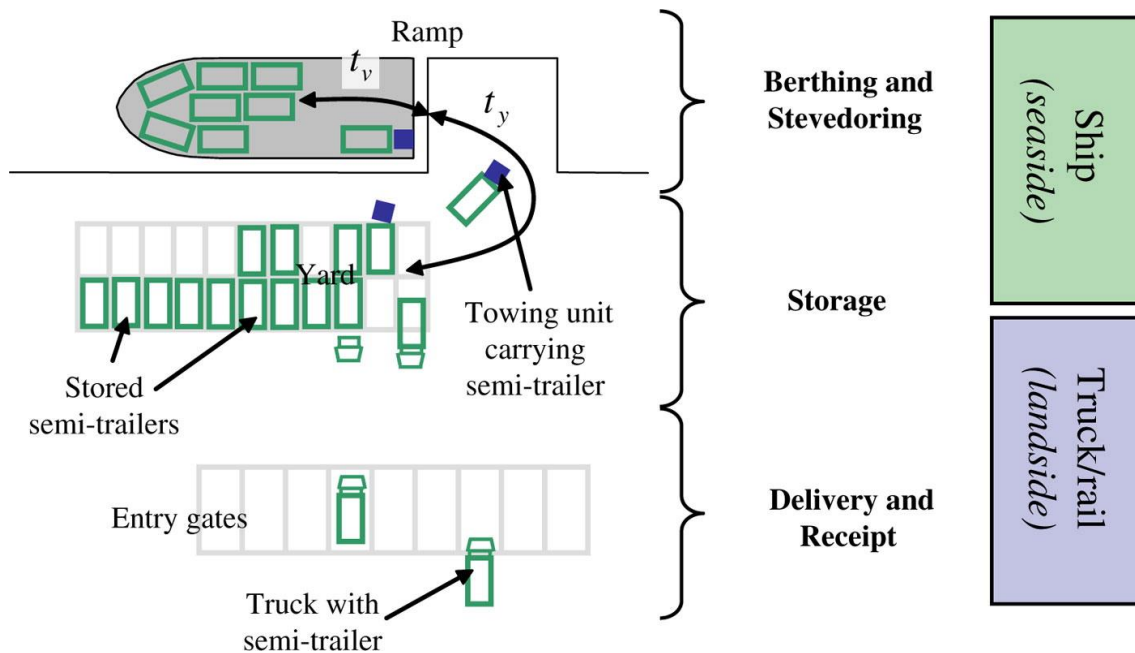
Si estas condiciones se dan pronostican un incremento de los tráfico de este tipo en los puertos y la necesidad de construir nuevas instalaciones y mejorar o adaptar las existentes.

³³² JICA es el acrónimo de Japan International Cooperation Agency

Bajo esta conceptualización en el que el diseño óptimo de terminales juega un papel determinante para su éxito competitivo, la modelización y optimización resultan un elemento realmente esencial.

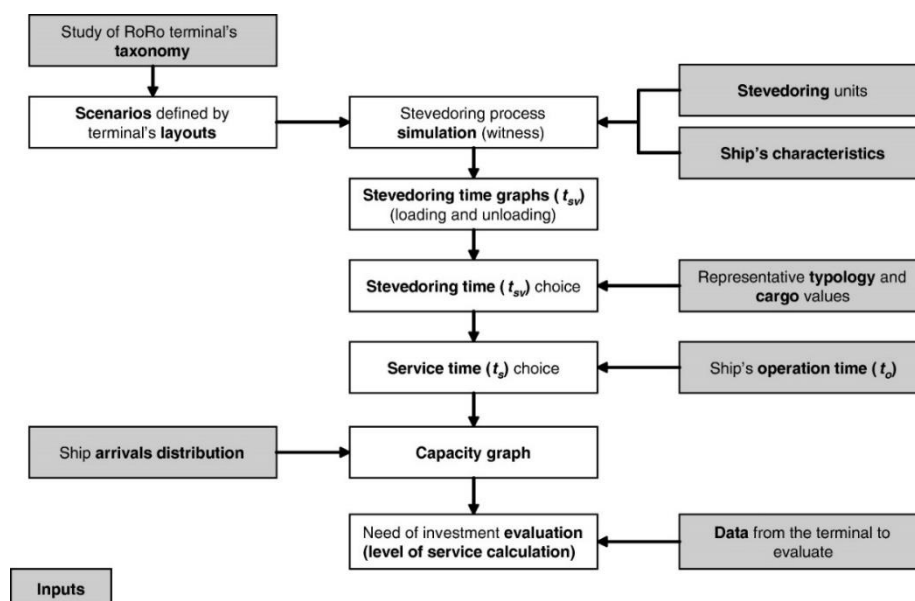
Fusco *et al.* (2010) tras el estudio de la configuración tipo de este tipo de terminales (que dividen en tres subsistemas tal y como se puede ver en la ilustración 222) proponen una metodología para su estudio (ilustración 223) y desarrollan un modelo analítico basado en teoría de colas que aplican a una base experimental práctica en una terminal Ro-Ro del puerto de Barcelona (España). Estos autores proporcionan además una guía o parámetros de calidad a aplicar en el diseño de este tipo de terminales.

Ilustración 222. Subsistemas de una terminal Ro-Ro.



Fuente: Fusco *et al.* (2010).

Ilustración 223. Metodología propuesta para el estudio de terminales Ro-Ro.



Fuente: Fusco *et al.* (2010).

Aksoy (2011), siguiendo con la línea de investigación que en su misma universidad habían iniciado Yildirim (2006) y Yaran (2009) vuelve a realizar una nueva tesis para la obtención del título de Máster realizando una modelización de una terminal Ro-Ro apoyándose en el software Arena© e incorporando esta herramienta comercial a este tipo de estudios. Mediante su modelo, el autor investiga las colas y ratios de ocupación en cuatro procesos críticos como son el punto de inspección de carga (control de rayos gamma), la propia rampa, la estación de combustible asociada a la terminal y las áreas de espera aledañas a la rampa.

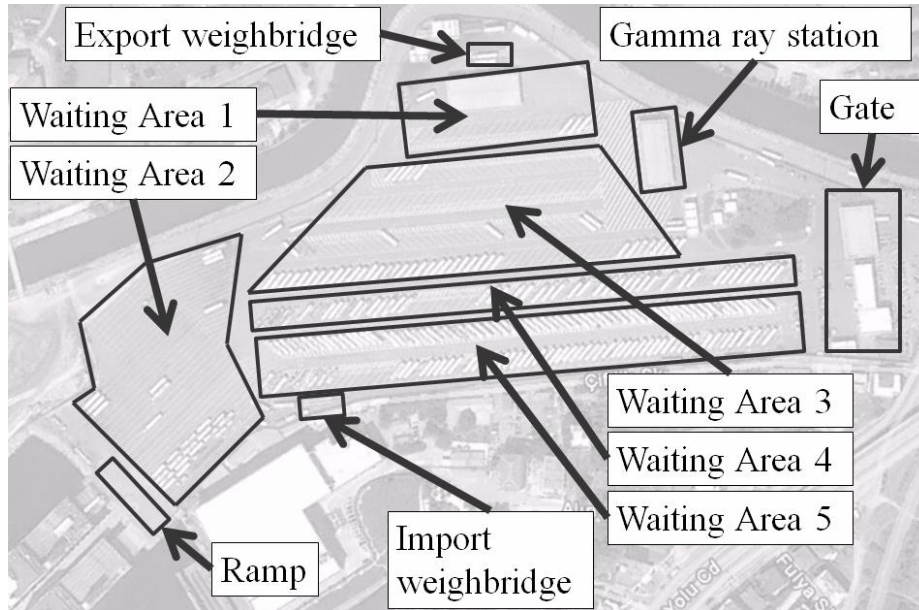
Keceli *et al.* (2013) crea un modelo a modo de DSS para ser usado por los operadores de la terminal en la operativa diaria de la misma. Su modelo lo verifican con datos reales de una instalación de estas características en Turquía que sirve como elemento para calibrar el mismo.

Estos autores son capaces de detectar el cuello de botella que supondrá la zona de aparcamiento y espera de vehículos al embarque en condiciones de máxima utilización de la terminal.

Desde el punto de vista práctico estos autores utilizan nuevamente el software comercial Arena v11©.

Para construir el modelo, empiezan por segmentar la terminal en diferentes zonas (ilustración 224): puerta de entrada o accesos terrestres de la terminal (“gate”), cinco áreas de espera (unas para cabezas tractoras y remolques en exportación y otras para estos elementos en importación, todas ellas denominadas “waiting área”), básculas de importación y exportación (“weighbridge”), estación de inspección (rayos gamma) y rampa de acceso al buque.

Ilustración 224. Segmentación del lay-out de la terminal Ro-Ro.

Fuente: Keceli *et al.* (2013).

A partir de aquí definen conceptualmente los procesos de exportación de camiones (ilustración 225) y *trailers* (ilustración 226), de importación de estos mismos elementos (ilustración 227 e ilustración 228 y respectivamente) y de llegada de buques (ilustración 229). Estos procedimientos son la base de programación del modelo en el software Arena©.

Ilustración 225. Proceso de exportación de camiones (“trucks”) en una terminal Ro-Ro.

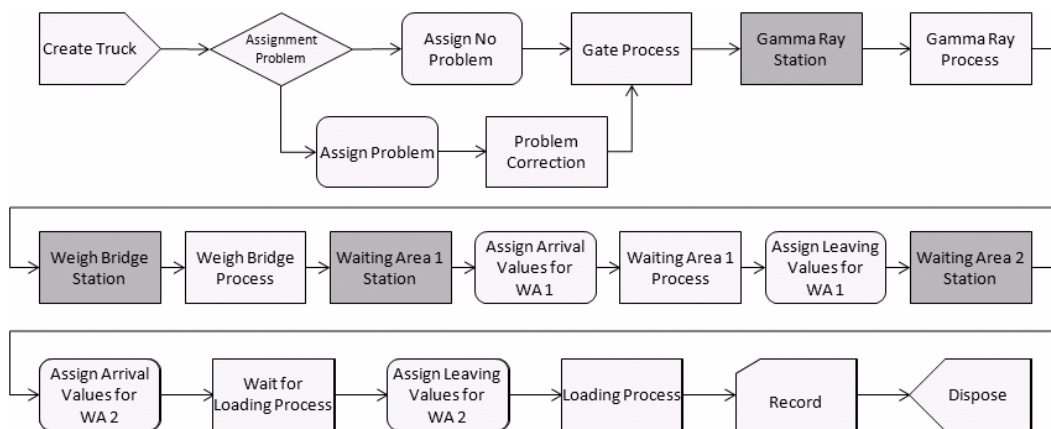
Fuente: Keceli *et al.* (2013).

Ilustración 226. Proceso de exportación de “trailers” en una terminal Ro-Ro.

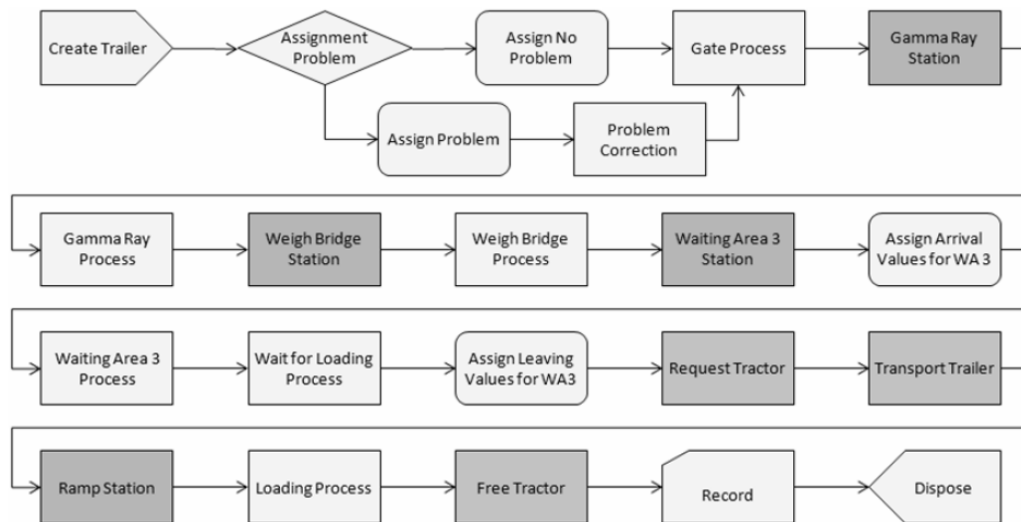
Fuente: Keceli *et al.* (2013).

Ilustración 227. Proceso de importación de camiones en una terminal Ro-Ro.

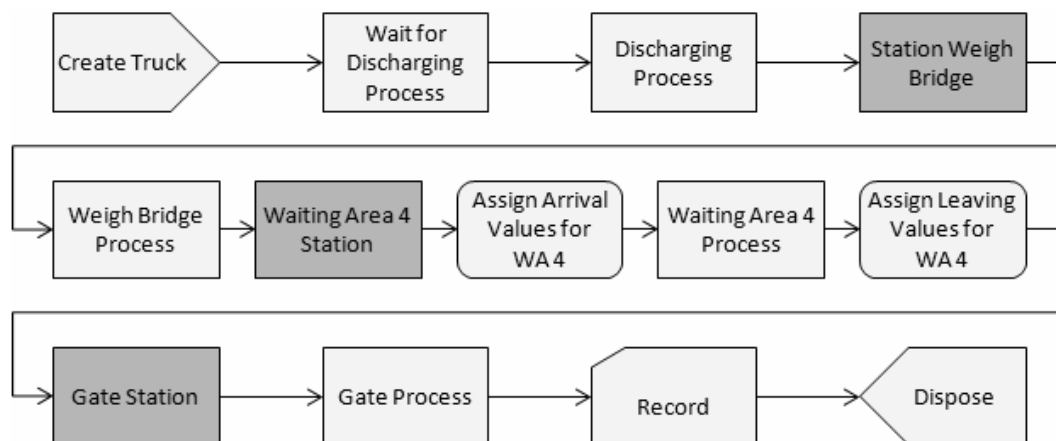
Fuente: Keceli *et al.* (2013).

Ilustración 228. Proceso de importación de trailers en una terminal Ro-Ro.

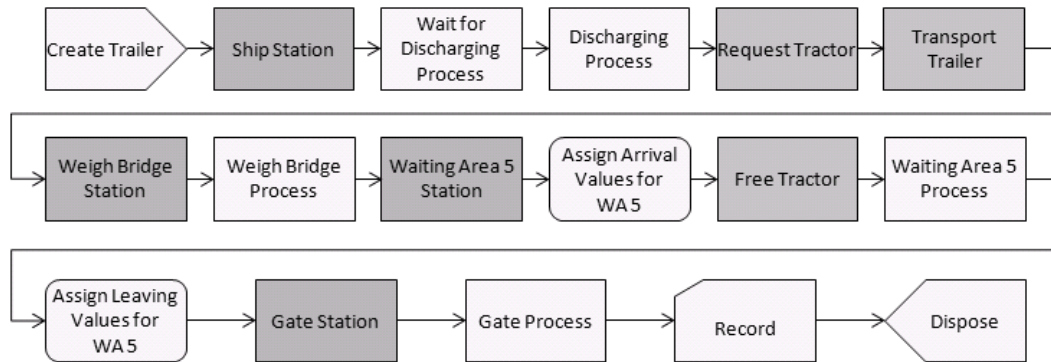
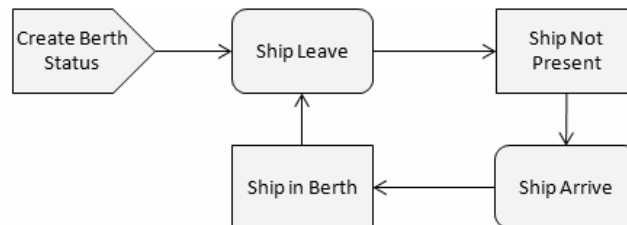
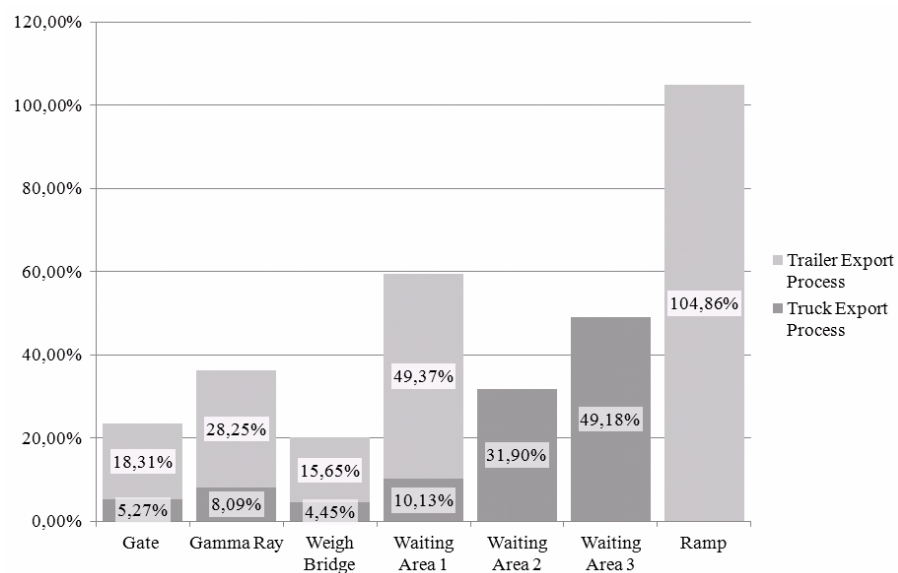
Fuente: Keceli *et al.* (2013).

Ilustración 229. Proceso de llegada de buques en una terminal Ro-Ro

Fuente: Keceli *et al.* (2013).

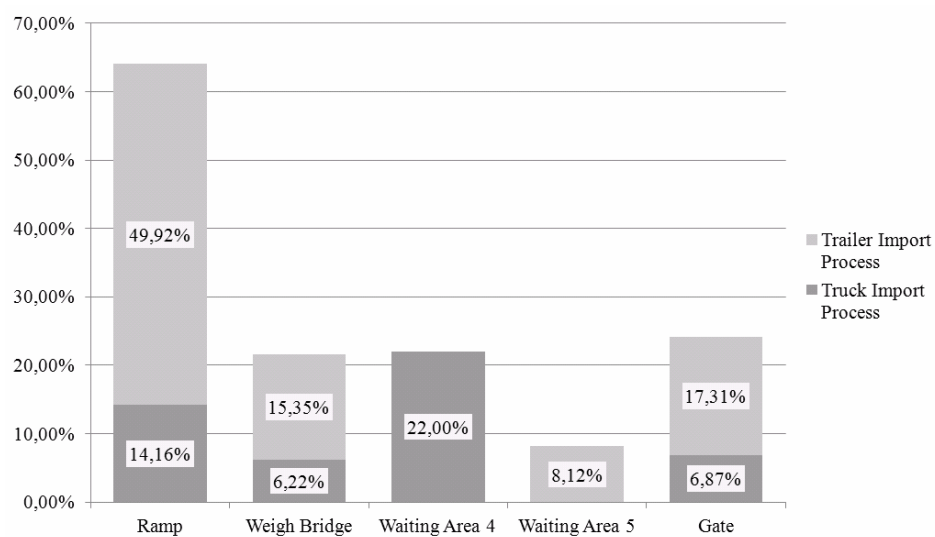
Como se ha comentado, este autor calibra el modelo con datos reales de una terminal que convierte en funciones de distribución mediante la librería *Arena Input Analyzer*. Tras su análisis aporta resultados tanto de los ratios de exportación (ilustración 230) como de importación de la terminal (ilustración 231) o el máximo número de elementos en cola (ilustración 232), datos que se incorporan en las siguientes gráficas a los simples efectos ilustrativos de las salidas que pueden analizarse con este tipo de modelos.

Ilustración 230. Resultados sobre ratios de utilización de los elementos de exportación en una terminal Ro-Ro de Turquía

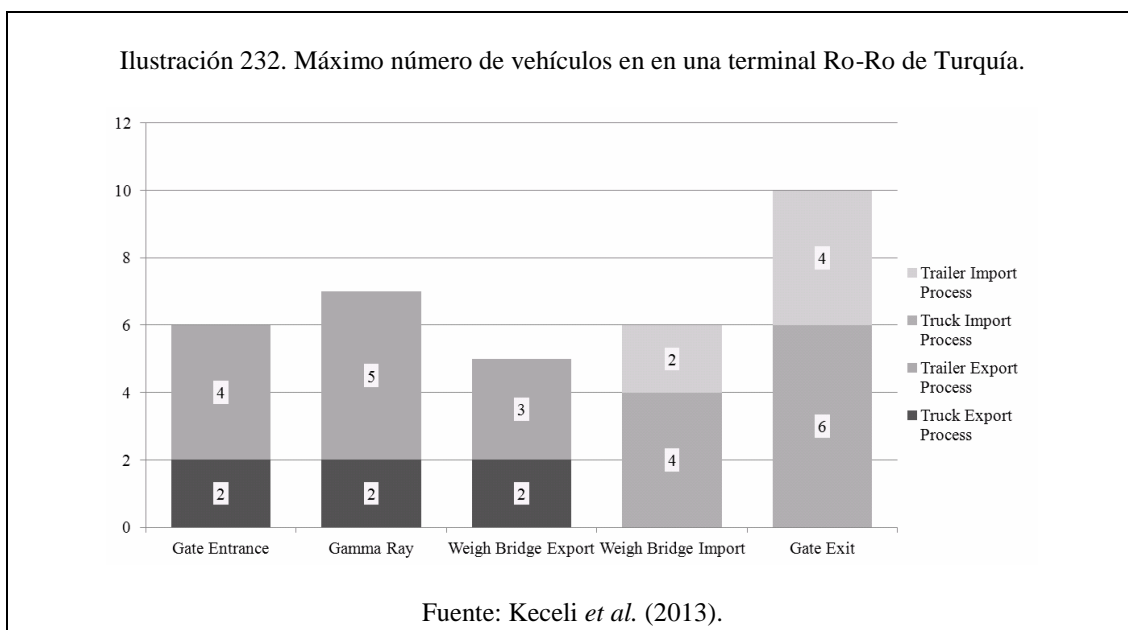


Fuente: Keceli *et al.* (2013).

Ilustración 231. Resultados sobre ratios de utilización de los elementos de importación en una terminal Ro-Ro de Turquía.



Fuente: Keceli *et al.* (2013)



Como puede verse los resultados del modelo apuntan a que las instalaciones de esta terminal se encuentran infrautilizadas a excepción de la rampa y, en ocasiones, el área de espera n°3; hecho que coincide con lo que los operadores de la terminal observan y que hace que en determinadas ocasiones hagan pasar elementos de esa área de espera a otras.

Los autores señalan como debilidad de su modelo su rigidez (sirve sólo para la terminal estudiada puesto que cuenta con una configuración y procesos determinados) y que en su diseño experimental la rampa Ro-Ro funciona como una única y separada unidad de explotación del puerto (algo que no tiene por qué ser la realidad ya que en muchas ocasiones las rampas Ro-Ro están incluidas en terminales multipropósito con otros tipo de tráfico con los que comparten espacios). Ambas limitaciones (rigidez e inserción en una terminal multipropósito) son futuras áreas de investigación que ya apuntan estos autores.

Siguiendo con la descripción histórica deben citarse los estudios de Tang *et al.* (2015). Estos autores empiezan por hacer un juicio crítico de los criterios históricos de dimensionamiento de estas terminales que basan el diseño de uno de sus elementos más decisivos (los *slots* de aparcamiento para *trailers* y cabezas tractoras) en procedimientos analíticos extraídos de las técnicas de planificación urbanística (diseño de zonas de estacionamiento). Obviamente, las características de una terminal Ro-Ro difieren sustancialmente de éstas.

Después de esta introducción justificativa proponen que la mejor manera de diseñar una terminal y comprobar su eficiencia es la modelización y para ello plantean un caso experimental con ayuda nuevamente del software Arena ©.

La terminal que estos autores modelizan es en realidad una terminal mixta con áreas de embarque y desembarque de pasajeros y zonas de embarque y desembarque de vehículos, si bien centran el ejercicio de simulación en la componente portuaria asociada a los vehículos.

Para ello definen cuatro sistemas o procedimientos que dan lugar a otras tantas colas:

- Sistema de llegada de vehículos a una terminal Ro-Ro (ilustración 233).
- Sistema de espera de vehículos a la espera de las inspecciones de seguridad (ilustración 234).
- Sistema de chequeos de seguridad de una terminal (ilustración 235).
- Sistema de embarque de vehículos (ilustración 236).

Ilustración 233. Sistema de llegada de vehículos a una terminal Ro-Ro.

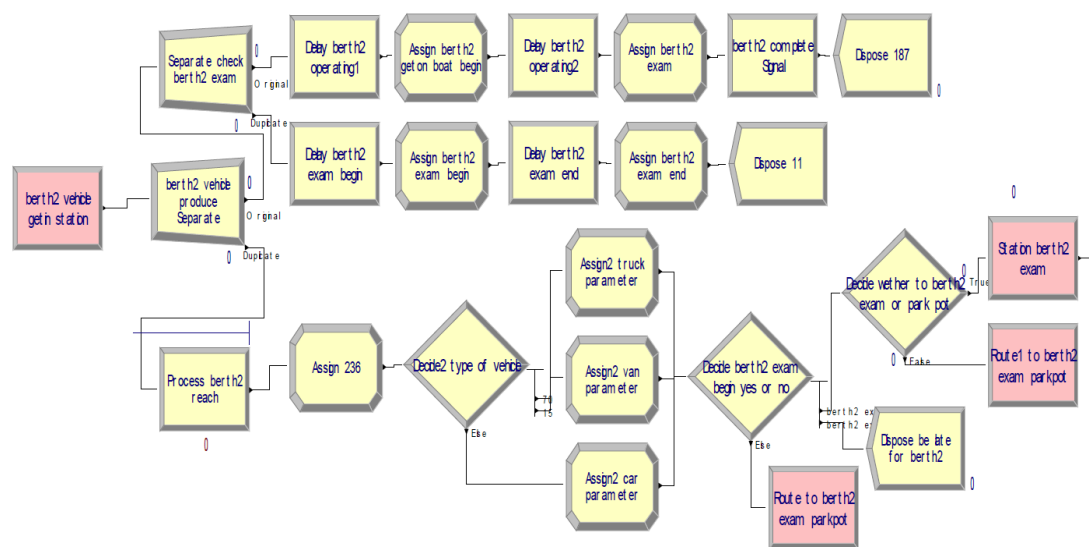
Fuente: Tang *et al.* (2015).

Ilustración 234. Sistema de espera de vehículos a la espera de las inspecciones de seguridad de una terminal Ro-Ro.

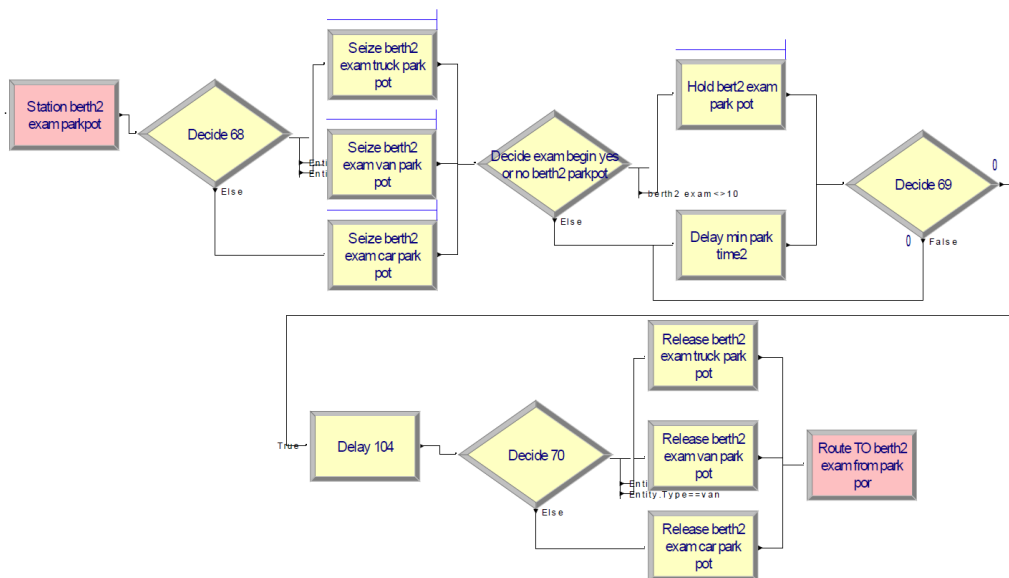
Fuente: Tang *et al.* (2015).

Ilustración 235. Sistema de chequeos de seguridad de una terminal Ro-Ro.

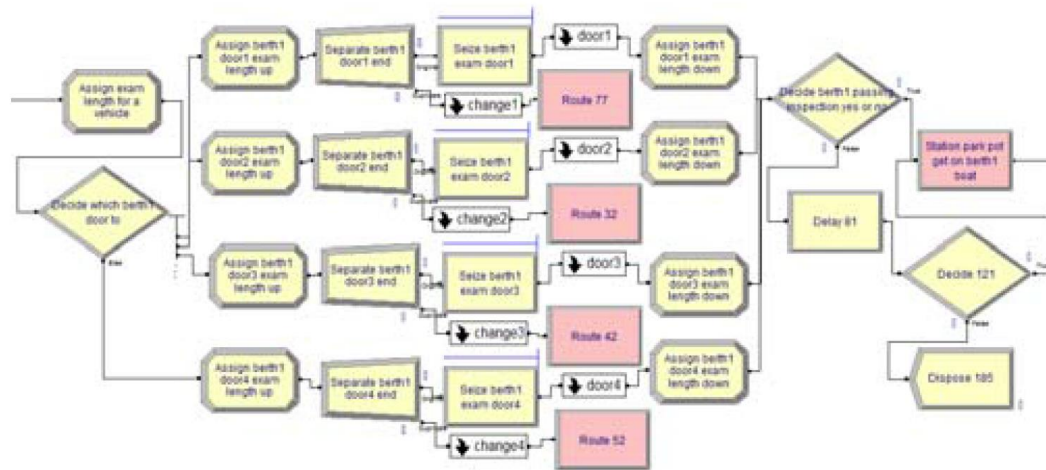
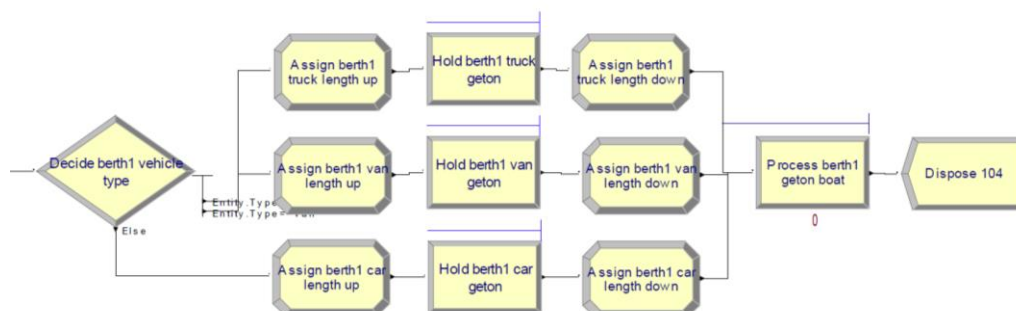
Fuente: Tang *et al.* (2015).

Ilustración 236. Sistema de embarque de vehículos en una terminal Ro-Ro.

Fuente: Tang *et al.* (2015).

Muravev *et al.* (2016) empiezan por poner de manifiesto la necesidad de que las terminales Ro-Ro cuenten con unos procedimientos operativos claros en la que todos los medios trabajen de una manera perfectamente organizada para evitar la aparición de elementos de congestión y cuellos de botella contribuyendo con ello a proporcionar los mejores ratios de rendimiento y mayores estándares de calidad. De igual modo, destacan como el tráfico Ro-Ro es, dentro las actividades portuarias, aquel tráfico que asegura una mejor y más directa conectividad entre modos de transporte, proporcionando un flujo cuasi-constante. Bajo este criterio las técnicas de predicción y resolución de problemas *ex-ante* son fundamentales y con ello la optimización mediante simulación muy recomendable tal y como ponen de manifiesto estos estudios citando numerosos trabajos e investigaciones anteriores.

Estos autores centran sus análisis en ver los resultados que se obtienen con dos software comerciales distintos. Por un lado utilizan Arena© (ilustración 237) y por otro Anylogic© (ilustración 238) comparando ambos y viendo cual proporciona unas mejores salidas del modelo en el experimento escogido para la modelización.

En primera instancia segmentan el problema estudiando dos flujos diferentes, el de exportación y el de importación (ilustración 239). Estos autores consideran todo tipo de vehículos: camiones, “trucks”, remolques y semirremolques, coches y otros vehículos especiales como, por ejemplo, los MAFI³³³ (ilustración 240).

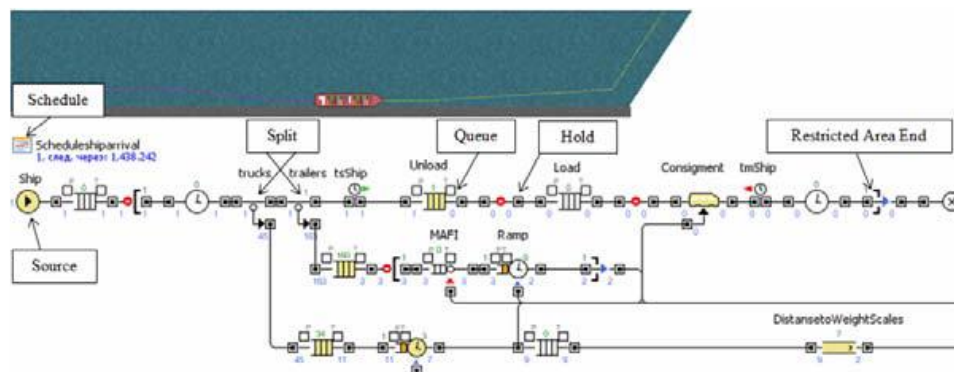
Como elementos de comparación entre ambos software utilizan el ratio de utilización de recursos (puerta de entrada y salida, instalaciones de inspección con rayos gamma, báscula de exportación e importación y MAFI's) y el número medio de medios en las zonas de espera (segregando en camiones y *trailers* de exportación y de importación).

Los resultados obtenidos se pueden ver en la ilustración 241 concluyendo que ambos modelos aportan cifras muy similares justificando la divergencia por los procedimientos aleatorios para generar *inputs* en el modelo (como consecuencia de la distribución estocástica con la que se generan).

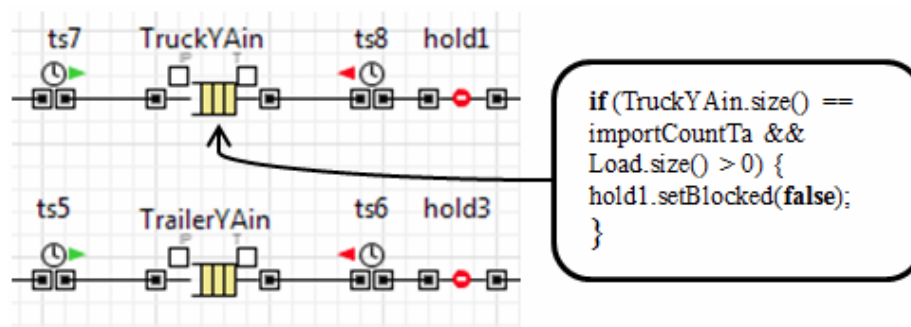
³³³ Los MAFI son una plataformas movidas por una cabeza tractora ideadas para el transporte de cargas especiales y grandes cargas muy utilizadas en el tráfico Ro-Ro. (Ilustración 240).

Ilustración 237. Modelo de funcionamiento de una terminal Ro-Ro usando AnyLogic 6.6.0 ©. Fuente: modelo de Kaceli (2016).

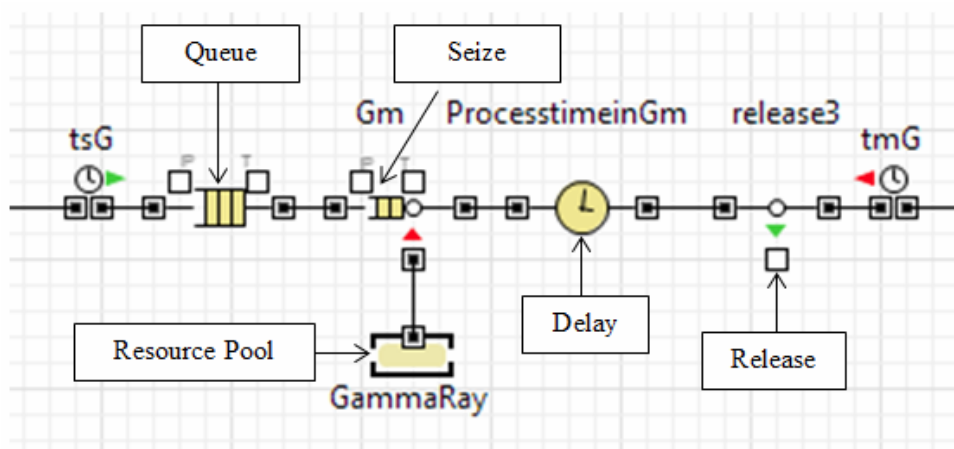
Fragment of flow diagram example in AnyLogic 6.6.0 imitating ship arrivals at Ro-Ro terminal



Example of programming code usage, performing condition at the beginning of loading operations



Fragment of flow diagram example in AnyLogic 6.6.0 imitating cargo inspection process at gamma ray station



Fuente: Kaceli (2016).

Ilustración 238. Modelo de funcionamiento de una terminal Ro-Ro usando Arena® .

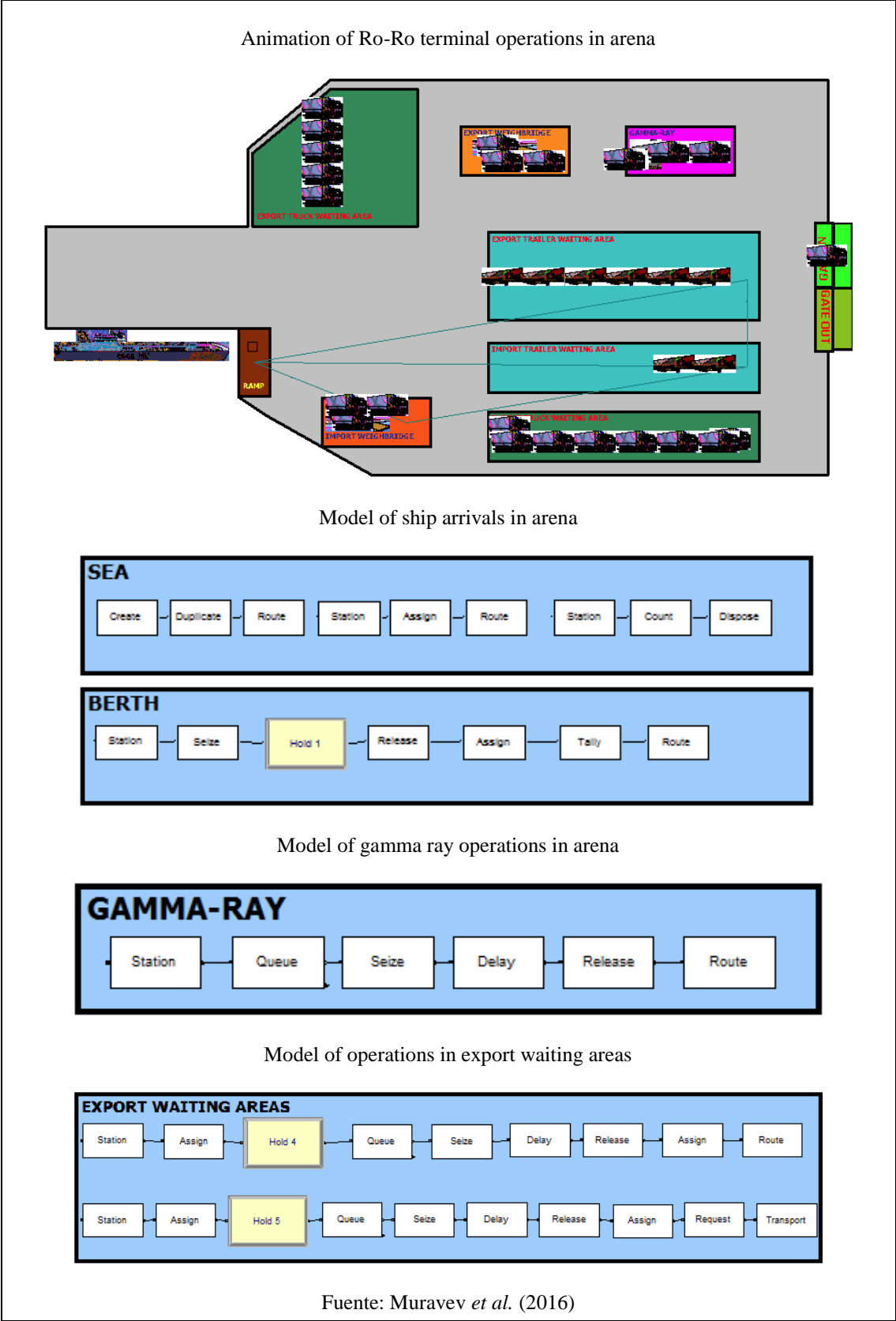
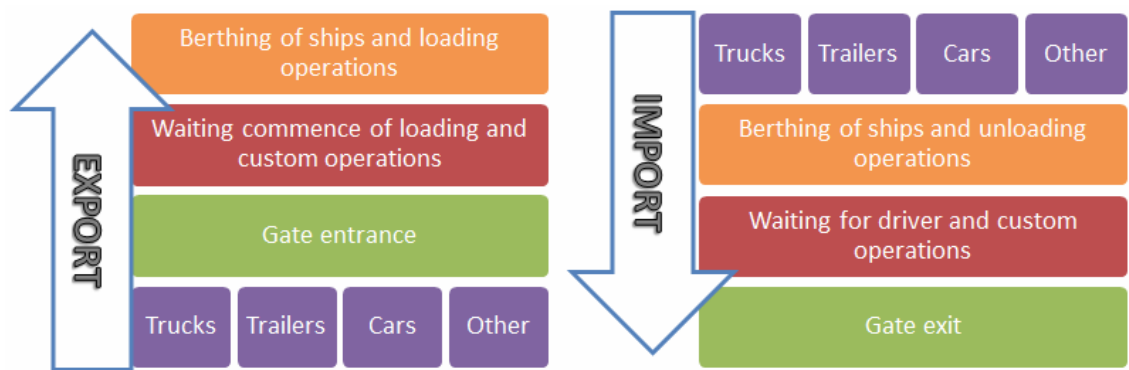


Ilustración 239. Flujo de operaciones de exportación e importación en una terminal Ro-Ro.



Fuente: incluido en Muravev *et al.* (2016).

Ilustración 240. MAFI's para operación de Tráfico Ro-Ro.



Fuente: Recopilación del autor de diversas casas comerciales³³⁴

³³⁴ Ilustraciones extraídas de las siguientes direcciones [fecha de último acceso el 01.10.2017]

<http://www.mafi.eu/typo3temp/images/cargo-trailer-system-2-01-ca.jpg>

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Mafi_carrying_crate.JPG

http://www.portstrategy.com/news101/products-and-services/mafi_oro_tractor_mt_36

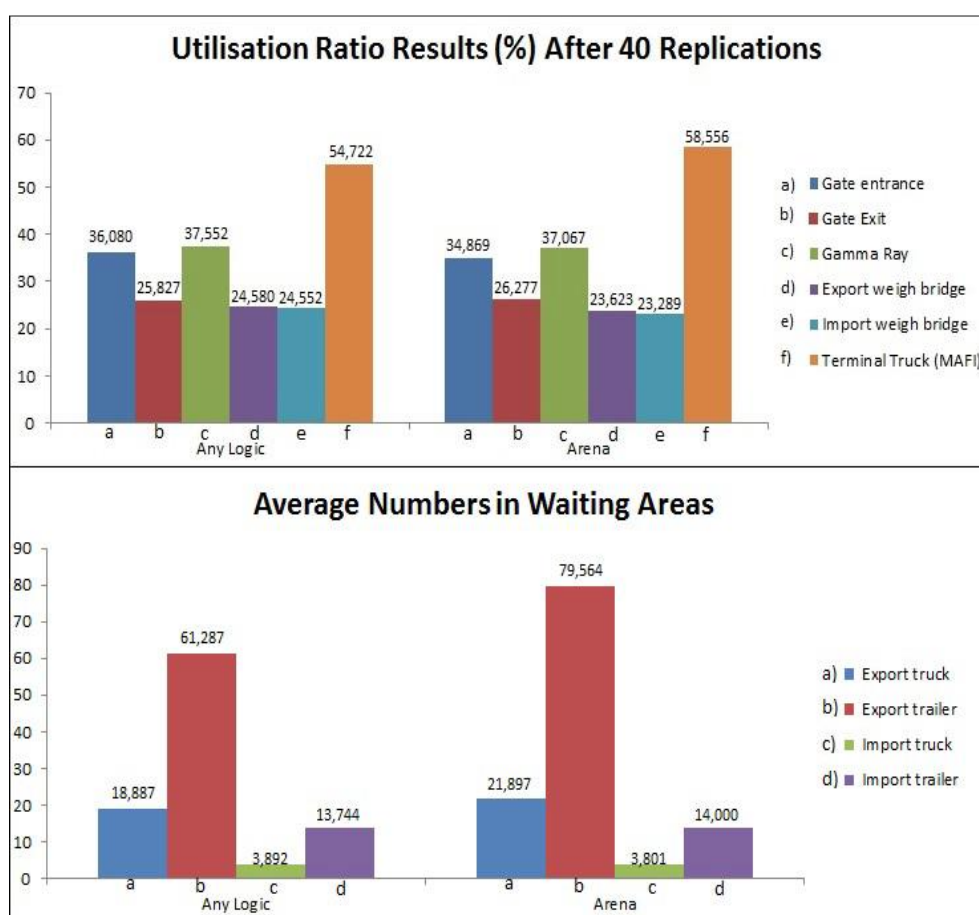
Ilustración 241. Comparación de resultados en la simulación de una terminal Ro-Ro usando AnyLogic © y Arena © .

Table 2 Utilisation ratio results of terminal resources (%)

	<i>AnyLogic</i>	<i>Arena</i>
Gate entrance	36,080	34,869
Gate exit	25,827	26,277
Gamma ray	37,552	37,067
Export weigh bridge	24,580	23,623
Import weigh bridge	24,552	23,289
Terminal truck (MAFI)	54,722	58,556

Table 3 Average numbers in waiting areas

	<i>AnyLogic</i>	<i>Arena</i>
Export truck	18,887	21,897
Export trailer	61,287	79,564
Import truck	3,892	3,801
Import trailer	13,744	14,000



Fuente: Muravev *et al.* (2016).

Iannone *et al.* (2016) proponen un modelo DES que ellos mismos describen como flexible para valorar las decisiones diarias de una terminal Ro-Ro (con especial énfasis en las tareas que sobre

los vehículos deben adoptarse en este tipo de terminales y que ya se han analizado al repasar las contribuciones de otros autores). Estos autores incorporan en su modelo no sólo parámetros operativos (tiempos, tasas de ocupación o rendimientos), sino que, yendo más lejos que otros autores incorporan los parámetros económicos y de coste de la operación.

Nuevamente utilizan en su estudio el software comercial Arena © comercializado por Rockwell Corporation. El modelo desarrollado por estos investigadores es nuevamente calibrado y contrastado con datos reales y los autores finalmente presentan un caso de estudio ilustrativo.

Terminando con el recorrido histórico de este tipo de terminales se encuentran los estudios de Özkan *et al.* (2016) muy interesantes y en los que se hará un especial foco para conocer el estado del arte actual de este tipo de modelos.

El objetivo fundamental de estos autores es determinar la capacidad de una terminal Ro-Ro utilizando técnicas de simulación y modelización. A los efectos de su ejercicio se define la capacidad de la terminal como el número total de vehículos que pueden utilizar sus instalaciones en el curso de un año (medido por tanto en vehículos/año).

Para estos autores, este tipo de terminales debe estar aún mejor diseñada que otras en términos de capacidad ya que sus usuarios (vehículos o personas) no pueden permanecer inmovilizadas como otro tipo de mercancías. Para ellos los aspectos que afectan a la capacidad de una terminal Ro-Ro (o mejor dicho a una línea Ro-Ro) son, entre otros, el número de vehículos que llegan a la terminal, la distancia entre las terminales de carga y descarga, la capacidad de los barcos, las entradas a las terminales, las unidades de control aduanero y de seguridad, los sistemas de control del tráfico y los procesos de *bunkering*.

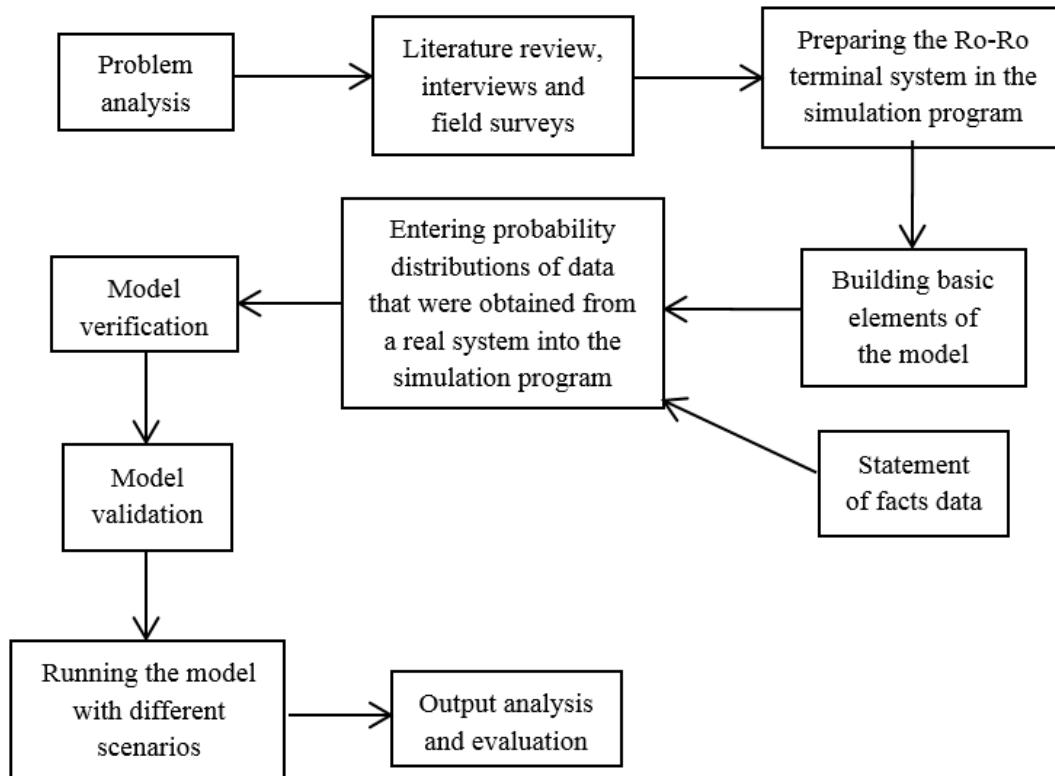
En una simplificación de la realidad estos autores modelizan en su estudio tres de estas variables: número de vehículos, distancia entre terminales y capacidad de los barcos (obviando por tanto la influencia que tienen los otros factores enunciados lo puede considerarse un razonable ejercicio de simplificación). Para cada una de estas variables realizan un análisis de sensibilidad de cuál es su influencia en la capacidad portuaria tal y como más adelante veremos.

En la metodología del estudio, que se presenta en la ilustración 242, comenzaron por analizar el funcionamiento de este tipo de terminales, revisando la bibliografía existente (escasa y toda capturada en esta tesis), para continuar con entrevistas con responsables de dos de las mayores terminales Ro-Ro de Turquía (Pendik y Cesme) y terminar el análisis previo con una campaña de observación del funcionamiento de las mismas y análisis de sus elementos críticos y que ya se han comentado (áreas de estacionamiento, básculas, puntos de inspección, etc...).

A partir de ahí establecieron el modelo teórico y su algoritmo secuencial (ilustración 243), pasando a determinar en base a datos reales las distribuciones que mejor ajustaban a cada uno de los procesos.

Para la confección del modelo utilizan el software Promodel 2011 y para calibrar su modelo utilizaron datos reales de Pendik Ro-Ro Terminal (Estambul, Turquía) del año 2013. Conforme estos datos llegan a la conclusión de que las distribuciones que mejor ajustan a los procesos de atraque y desatraque del buque, descarga de cada vehículo y carga de cada vehículo es del tipo normal (ilustración 244).

Ilustración 242. Metodología para el estudio de una terminal Ro-Ro.



Fuente: Özkan *et al.* (2016).

Ilustración 243. Algoritmo del modelo de una terminal Ro-Ro.

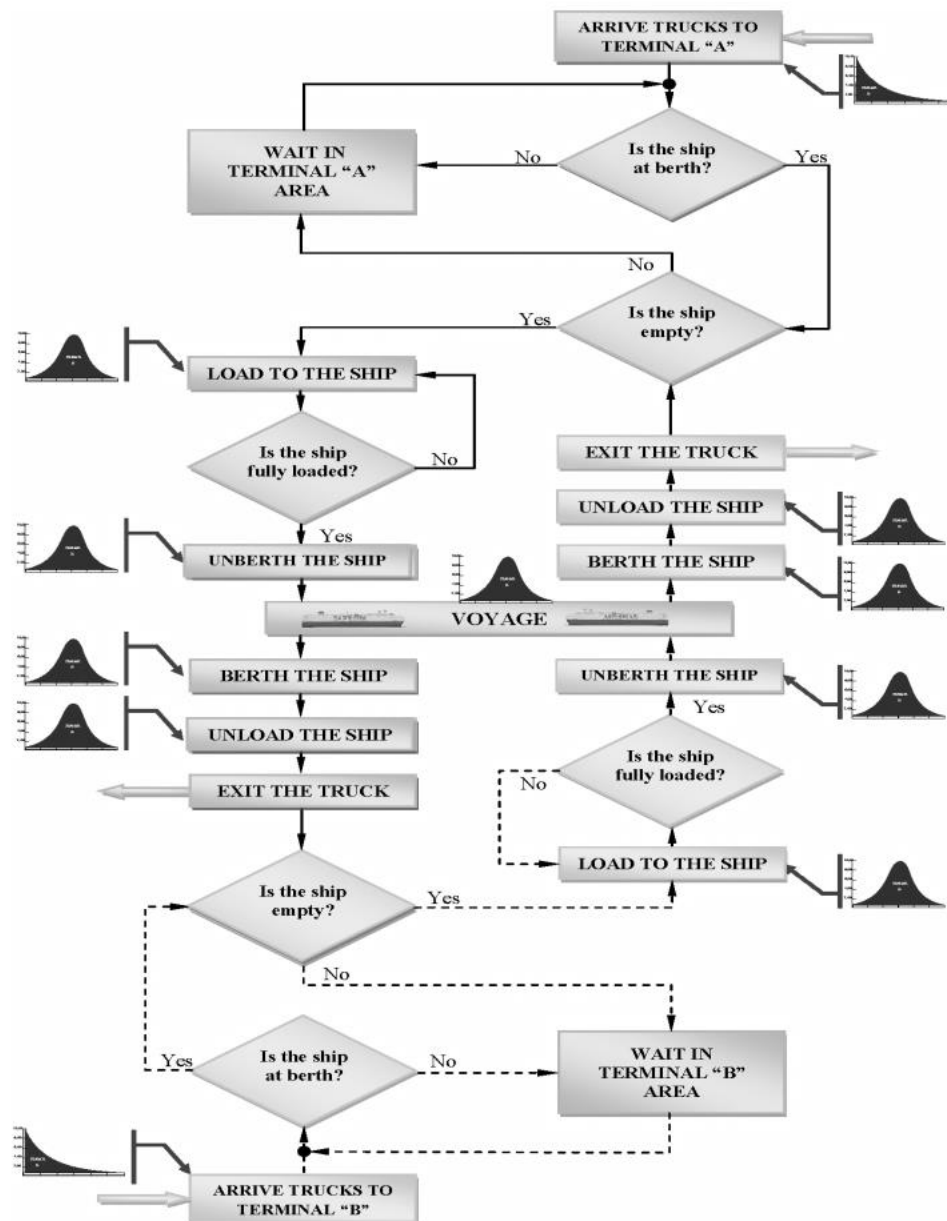
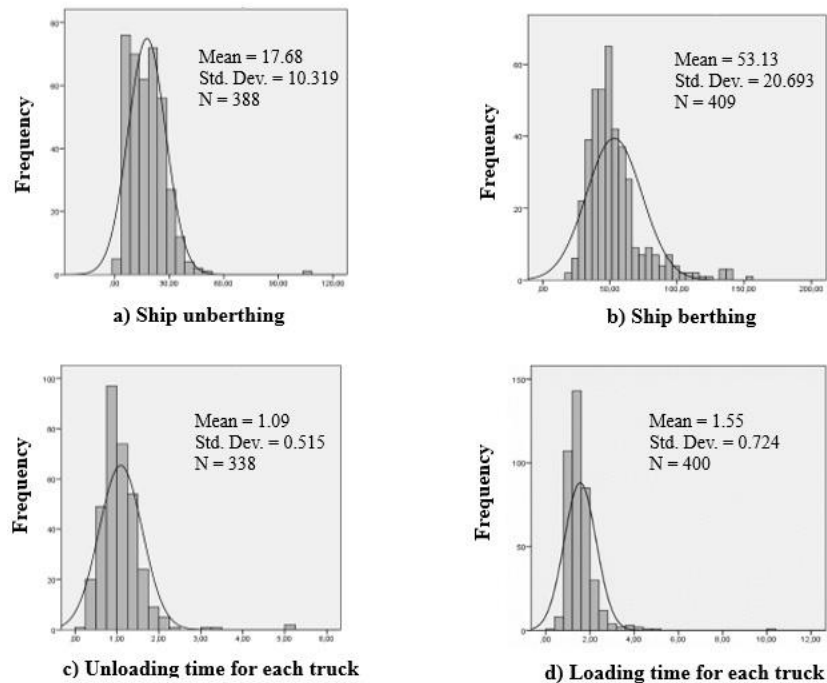
Fuente: Özkan *et al.* (2016).

Ilustración 244. Distribución estadística de los procesos de atraque, desatraque, descarga de cada vehículo y carga de cada vehículo en Pendik Ro-Ro Terminal (Estambul, Turquía).



Fuente: Özkan *et al.* (2016).

El modelo de estos autores presenta una serie de simplificaciones que los mismos autores enumeran. A saber:

- La capacidad de la terminal se define como el número de vehículos que pueden transitar por la misma en un año dado;
- Todos los vehículos son camiones, no permitiéndose otro tipo de elementos (semirremolques, MAFI's, etc.);
- El sistema está compuesto por dos únicas terminales que son unidas por el barco de una manera circular;
- El sistema es servido por dos únicos barcos, los cuales siempre encuentran atraque cuando llegan al puerto;
- No se producen otros fenómenos que reducen la capacidad de la terminal (tal y como congestión en los accesos a la misma, retrasos en la carga o descarga por trámites aduaneros, de seguridad o cualquier otro tipo de incidencia administrativa);
- La operativa se realiza primero descargando todos los vehículos del barco y luego cargando todos los que están a la espera en el puerto;

-
- La velocidad de los buques entre las dos terminales tiene una distribución normal con media de 17 nudos y desviación de 2 nudos;
 - No se consideran afecciones por condiciones climatológicas adversas (ni en la navegación de los buques, ni en sus operaciones portuarias);
 - La llegada de camiones a la terminal sigue una distribución exponencial;
 - Los tiempos de carga / descarga de buques, así como los tiempos de atraque o desatraque del buque siguen distribuciones normales; y,
 - Todos los vehículos son del mismo tipo y ocupan un espacio de 20 m² con 15 metros de longitud.

Los resultados de la capacidad del puerto se expresan como se ha comentado en función de tres variables o escenarios experimentales, que se hacen oscilar entre los límites que a continuación se describen y que se someten a bandas de confianza superior e inferior, representando los resultados en forma de gráfica. En todos ellos se corren un total de 20 simulaciones a lo largo del periodo equivalente de 1 año (8.760 horas), entendiéndose que el modelo ha conseguido una estabilización inicial cuando ha transcurrido 1 mes (720 horas) y las posibles colas han podido formarse.

- Variable 1: Número de vehículos que llegan a la terminal. Intervalo: 10.000-28.000 vehículos/año (ilustración 245),
- Variable 2: Distancia entre terminales que definen el servicio. Intervalo 80–1.120 millas náuticas(ilustración 246),
- Variable 3: Capacidad de los barcos. Intervalo 80 – 240 vehículos / barco (ilustración 247).

En el análisis del caso estudiado por estos autores (conclusión que no es necesariamente extrapolable a otros casos) se pone de manifiesto que el factor determinante de la capacidad es el número de vehículos que llegan a la terminal por lo que recomiendan a los gestores de la terminal que presten atención a los sistemas de predicción de la demanda para no alcanzar situaciones de saturación.

4.4.2 Terminales de vehículos.

Otro tipo de terminales en las que puede encontrarse algo de literatura especializada es el de terminal de vehículos. Este tipo de terminal presenta claras analogías a las terminales Ro-Ro de mercancía que se acaban de revisar en tanto que el proceso de carga y descarga de los *car carriers* es también mediante una rampa Ro-Ro.

Por lo tanto, el proceso de modelización y optimización se antoja relativamente similar a las anteriores pudiendo establecerse, no obstante, algunas diferencias como sería el tamaño de la terminal y los requerimientos de espacios necesarios (las terminales de automóviles resultan como norma general mucho más grandes requiriendo unas dimensiones de explanadas mucho más relevantes) o la conexión con el hinterland que suele también contar con terminal ferroviaria asociada

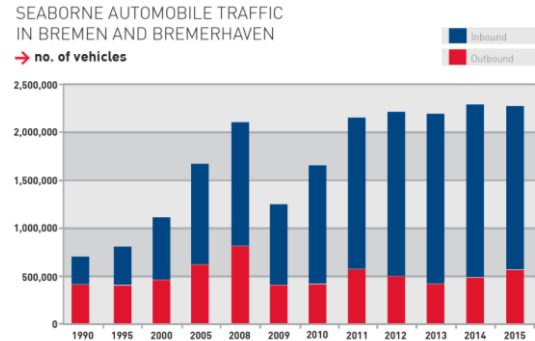
Los primeros autores que abordan este tipo de terminales desde el punto de vista de la modelización y de una manera relativamente completa son Mattfeld y Kopfer (2003), trabajo que sería más tarde completado en Mattfeld (2006). En este trabajo se realiza un estudio mediante simulación en relación a la asignación de medios humanos y control de inventarios en las operaciones de transbordos de una gran terminal *hub* de automóviles. El contexto experimental utilizado es la terminal de vehículos de Bremerhaven (Bremen, Alemania) (ilustración 248), donde anualmente se mueven más de 2 millones de vehículos (ilustración 249).

Ilustración 248. Terminal de vehículos de Bremerhaven (Alemania).



Fuente: Autoridad Portuaria de Bremerhaven (<http://www.bremenports.de/en/statistics>).

Ilustración 249. Volumen de tráfico de vehículos en el puerto de Bremerhaven (Bremen, Alemania).



Fuente: Autoridad Portuaria de Bremerhaven (<http://www.bremenports.de/en/statistics>).

En esta terminal se dan tanto operaciones de exportación (fundamentalmente de Alemania a Estados Unidos) como de importación (usualmente de marcas asiáticas que utilizan el puerto de Bremen para tener un *stock* logístico con el que competir con los productores europeos).

Estos autores empiezan justificando la conveniencia de implantar procedimientos de modelización en este tipo de terminales en base a la actual oligárquica estructura de mercado que ha llevado a la construcción de grandes centros *hub* de distribución de vehículos a escala planetaria (Marketline, 1998) y el incremento experimentado por estos tráfico en los últimos años (Drewry, 1999).

De igual modo indican que si bien existe bibliografía de referencia para ayudar en la implementación de estas técnicas, no existía a la fecha ninguna referencia concreta que tratase estas terminales específicamente desde el punto de vista de la modelización. Estas infraestructuras podrían encontrar ciertas analogías con las terminales de contenedores si sobre ellas se quisiese plantear un ejercicio de simulación-optimización; sin embargo, tienen también unas diferencias básicas que deben tener su respuesta desde una perspectiva metodológica. Además, según éstos investigadores, estas terminales también presentan ciertas similitudes con las terminales de graneles:

- Primero, los sistemas de gestión de contenedores están basados en unas reglas que no necesariamente aplican a los vehículos.
- Por otro lado, los contenedores en un patio pueden sufrir más remociones que un vehículo en su área de depósito por el riesgo que supone dañar los mismos. De este modo, un objetivo fundamental en la gestión de estas terminales es minimizar los movimientos (optimizando el depósito desde el inicio) y, bajo esta premisa, el almacenamiento por grupos de vehículos cobra especial importancia en una planificación de medio plazo. Estos autores, citando a

Drewry (1999), indican que un nivel de daños del 0,5% al 1% resulta inadmisible y que los productores, dado el riesgo de daño, no aceptan los movimientos interiores intermedios pudiendo perder el terminal si su contrato si incumple estas reglas. Por ello, como base de su modelo y para acercarse a estas condiciones comerciales, estos autores imponen como restricción del modelo que no puedan realizarse estas maniobras intermedias.

- Por último, mientras que los contenedores se apilan en tres dimensiones (apilado en altura), los vehículos sólo lo hacen en dos (depósito en superficie). Esto lleva usualmente a unas grandes explanadas (no necesariamente cercanas a los muelles) en donde la minimización de distancias toma, aún si cabe, más importancia en aras de una mayor eficiencia de la terminal.

Adicionalmente, estos autores describen como la dinámica de este tipo de terminales requiere gran volumen de movimientos en un entorno de mucha complejidad, donde las reacciones a corto plazo están desplazando a la posibilidad de planificar en un horizonte de medio plazo. En tal sentido, desarrollan un modelo con una jerarquía en dos niveles; uno más elevado para la planificación a medio plazo (*planning*) y otra de mayor detalle para tener en consideración decisiones de corto (*scheduling*). Conceptualmente su modelo representa un sistema de planificación *rolling* (ajustes periódicos según avanza el tiempo) en el que se van adaptando periódicamente los turnos de trabajo para maximizar los movimientos y minimizar los costes.

Como se ha comentado su modelo se realiza sobre la base real de la terminal de Bremerhaven (Bremen, Alemania) que en ese momento contaba con 90.000 *slots* de aparcamiento, en el que se definen 80 bloques de almacenamiento interno y 60 bloques de almacenamiento externo. Para las áreas de almacenamiento externo se toma como hipótesis que no existe restricciones de capacidad que se aplican intrínsecamente solo a las áreas internas.

A efectos de explotación de resultados se trabaja en términos de productividades (número de vehículos que pueden moverse de un área a otro por unidad de tiempo) en vez de distancias entre zonas. Esto se hace para considerar adecuadamente los tiempos de preparación y maniobra de vehículos.

Desde el punto de vista de la programación, el núcleo de su modelo se basa en lo que denominan “tarefas”, dividiendo las mismas entre “*storage tasks*” y “*retrieval tasks*” según correspondan a un movimiento de depósito del vehículo en el área de aparcamiento o corresponda a una retirada del mismo de la explanada para su definitiva importación (salida del puerto por medio terrestre) o exportación (salida marítima por medio marítimo).

Otro elemento esencial del modelo es que para asegurar una operación segura y fiable las operaciones se organizan en manos o cuadrillas de conductores (de entre 5 y 50 según necesidades) cuyo tamaño no es conocido de antemano y puede variar según las necesidades conforme avanza el reloj de la simulación.

Desde el punto de vista computacional no se ponen estricciones al personal (dado que indican que los conductores resultan fácilmente contratables dentro del *pool* de trabajadores del puerto).

Desde la perspectiva del almacén jerárquico los autores organizan la planificación a medio plazo como un modelo superior y el *scheduling* a corto como un modelo inferior; el primero considerando la mano de obra de una manera agregada en término de horas de conductor y el segundo considerando directamente el número de conductores.

Un interesante avance en la explotación de este modelo es la posibilidad de interactuar entre el terminalista y los clientes en la fase de planificación para mejorar la gestión de la misma y los resultados obtenidos.

El modelo se puso en explotación en el año 2001 y 2002 y se compararon los resultados obtenidos con la operación bajo este modelo y los que se obtuvieron en el año 2000 antes de que el mismo estuviese implantando. Los autores reportan que se logró un ahorro en el tiempo medio utilizado por vehículo movido (de 9.21 vehículos/minuto en el año 2000 a 9.17 vehículos minuto en el 2001 en el caso de tareas de depósito y de 15.2 a 14.8 vehículos/minuto en el caso de retirada de los mismos) que condujo a mejoras globales en la productividad de hasta el 16.3% (para el caso de la importación). Los autores indican que esta mejora se materializó a pesar de haberse incrementado el volumen de tráfico desde 1,07 millones en 2000 a 1,19 millones en 2001 lo que podría apuntar a un decremento de las productividades por vehículo por efecto de mayores situaciones de congestión o conflicto.

Chen y Chen (2004) realizan un estudio de corte teórico que según ellos mismos puede servir de referencia para el diseño de las terminales de automóviles en China. En su artículo se describen los elementos esenciales del proceso de manipulación en este tipo de terminales y se ofrecen conclusiones sobre la configuración óptima de las mismas. Sus estudios inspirarán los trabajos posteriores de Liu y Zhang (2006) y Zhan *et al.* (2009a y 2009b) y Long y Zhang (2010) quienes también se ocupan del diseño y operación de zonas de aparcamiento en terminales de automóviles y tratan aspectos generales de diseño en este tipo de terminales en el gigante asiático. Este conjunto de estudios es la respuesta al fuerte incremento de las importaciones de vehículos en China como consecuencia de su gran crecimiento económico, donde las necesidades de espacio crecían exponencialmente y donde no existía una tradición en la gestión de este tipo de terminales que debía desarrollarse con celeridad para evitar problemas de capacidad.

Históricamente el gobierno chino solo había otorgado licencias para importación de vehículos a un número limitado de terminales y cuando los volúmenes de importación se mantenían bajos, los automóviles eran incluso importados en contenedores en vez de ser descargados mediante rampas Ro-Ro (Hua, 2013). Así, hasta el año 2010 solo tenían autorización de importación Shanghai, Tianjin, Guangzhou y Dalian y sólo en este año se unió Quinzhou y en el año 2013 los puertos de Fuzhou, Qingdao, Zhangjiagang and Ningbo Meishan (ilustración 250). Desde esta

perspectiva y con las tasas de crecimiento históricas y esperadas era evidente la necesidad de construir terminales especializadas en China a principios de los años 2000³³⁵.

Ilustración 250. Terminales autorizadas para importación de vehículos en el año 2013.



Fuente: Hua (2013).

Así, continuando con la senda que habían marcado Chen y Chen (2004), y en línea de lo que se comentado Liu y Zhang (2006) realizan unas recomendaciones para la construcción de muelles en terminales de automóviles en base a un análisis de otras experiencias existentes. Estos estudios serán ampliados en Long y Zhang (2010).

Mai (2007) realiza un estudio sobre los requerimientos del mercado de *car carriers* y líneas Ro-Ro dedicadas al transporte de vehículos en China estudiando las rutas de cabotaje asociadas a este tipo de tráfico, incidiendo en temas relativos más a la ingeniería y construcción de este tipo de terminales que a la operación de las mismas.

³³⁵ Y aunque así lo hizo el gobierno chino, el crecimiento de la demanda fue muy superior a la esperada y ya a finales de la primera década de los años 2000 se experimentaban serios problemas de capacidad, fundamentalmente escasez de espacios. Efectivamente, como se desprende de Hua (2003) citando como ejemplo la terminal Ro-Ro de Tianjin (China) fue puesta en operación en el año 2005 y ya el año siguiente la demanda desbordó sus posibilidades experimentándose un bloqueo del puerto y unas crecientes espera de buques *car carriers*. Nuevas instalaciones fueron sucesivamente poniéndose en operación hasta tal punto que finalmente se observó el problema contrario (sobrecapacidad).

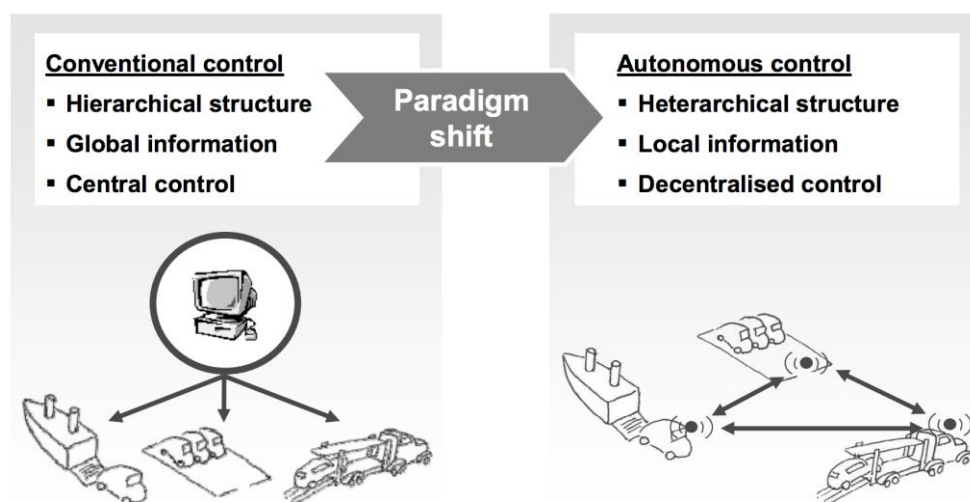
Böse *et al.* (2005) y más tarde Böse y Windt (2007) realizan un interesante trabajo sobre la posibilidad de realizar una gestión autónoma del almacenamiento en una terminal de vehículos. Su modelo es aplicable tanto a una terminal portuaria como a una explanada para el depósito de vehículos en una plataforma logística cualquiera ya que, aunque lo aplicaron sobre una terminal portuaria, no tienen en consideración la carga / descarga de los vehículos en los *car carriers* quedándose simplemente en la optimización de su almacenamiento.

Definen primero la cadena logística desde el fabricante al concesionario pasando por una terminal de depósito intermedia y describen como todo el proceso está tradicionalmente gestionado por sistemas centralizados y defienden la posibilidad de abandonar estos sistemas tradicionales de tal manera que el propio vehículo sea capaz de tomar la decisión de donde almacenarse en función de sus propios objetivos; idea que es extraída de Scholz-Reiter *et al.* (2006).

Desarrollan un modelo en el que conviven objetos materiales (vehículos y espacios de almacenamiento) e inmateriales (órdenes de entrega a clientes) que son capaces de intercambiar información y tomar las mejores decisiones dentro de una red logística así configurada.

Siendo así, tal y como se observa en la ilustración 251, en el nuevo paradigma de naturaleza autónoma se trabaja también con una estructura jerárquica pero el sistema se basa en información local (en vez de en información global como en los sistemas tradicionales) y con un nivel de decisión descentralizado (en contraste con los niveles anteriores de naturaleza centralizada).

Ilustración 251. Cambio de paradigma de distribución desde sistemas convencionales a estructuras de control autónomo.

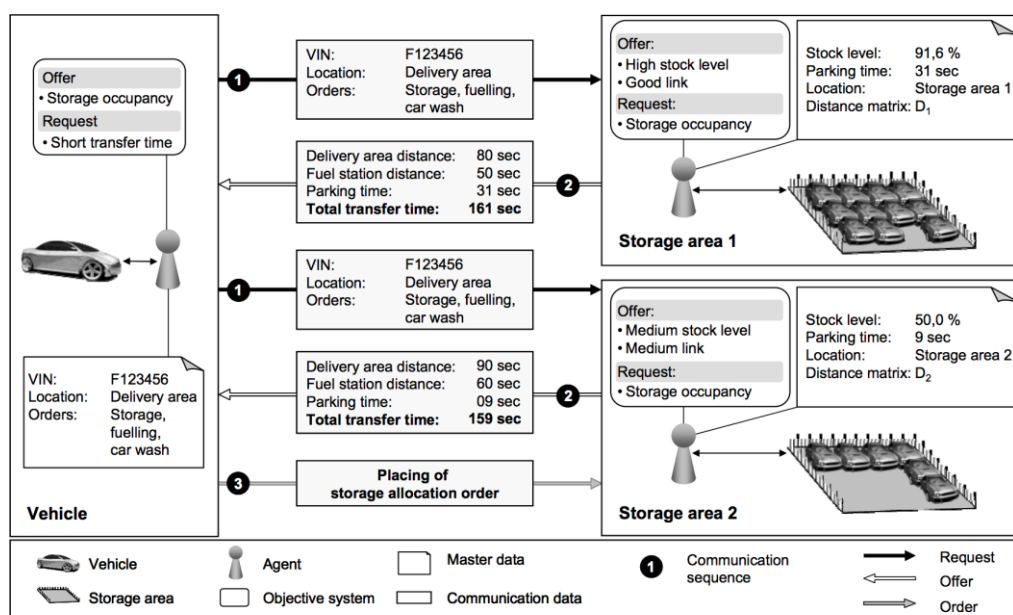


Fuente: Böse y Windt (2007).

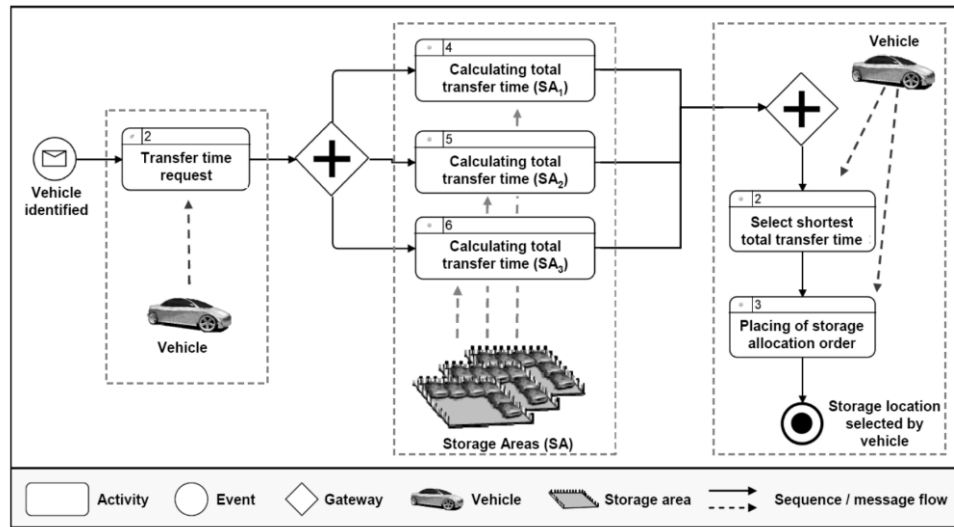
Para estos autores, para que estos sistemas se puedan poner en marcha de manera satisfactoria se requiere un alto grado de interconexión entre los objetos que configuran el sistema. Estos tienen que estar compartiendo información continuamente. En este contexto las tecnologías RFID (*Radio Frequency IDentification*) y GPS (*Global Positioning System*) para el posicionamiento de

los vehículos y los UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y WLAN (*Wireless Local Area Network*) para el intercambio de datos, son elementos claves del sistema. La aplicación de estas tecnologías es discutida en unos interesantes artículos de Böse *et al.* (2005) y Böse y Lampe (2005) (ilustración 252 e ilustración 253).

Ilustración 252. Esquema del proceso de decisión en una terminal de automóviles con funcionamiento autónomo.



Fuente: Böse y Windt (2007).

Ilustración 253. Asignación descentralizada de *slots* de depósito en una terminal autónoma de vehículos.

Fuente: Böse y Windt (2007).

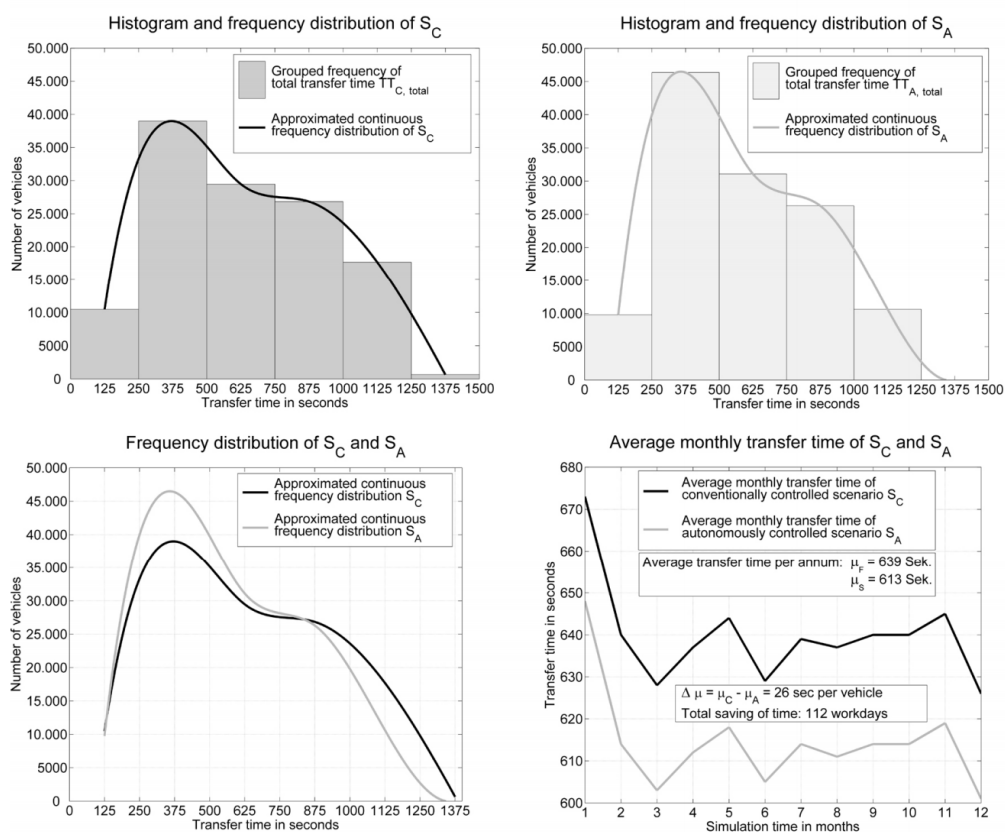
Los autores realizan un ejercicio de simulación en la terminal E.H.Harms Auto-terminal de Hamburgo (Alemania) con capacidad de 1.500 *slots* de vehículos (ilustración 254), utilizando en el ejercicio de simulación datos de 1 año completo (movimientos de 124.000 vehículos), ofreciendo un análisis de cuál es el resultado que se obtuvo con un sistema centralizado convencional (denotado con subíndices de letra “C” en la ilustración 255) y el que se hubiera obtenido con un sistema autónomo como el descrito por ellos (denotado con subíndices de letra “A” en dicha gráfica).

Los resultados se evalúan considerando como variable de investigación el tiempo de transferencia total o tiempo que transcurre entre que un vehículo recibe la orden y va a su zona de estacionamiento, permanece en esta área de depósito y finalmente se dirige a su zona de embarque.

Ilustración 254. Terminal E.H.Harms Auto-terminal de Hamburgo (Alemania).

Fuente: BLG Logistics³³⁶

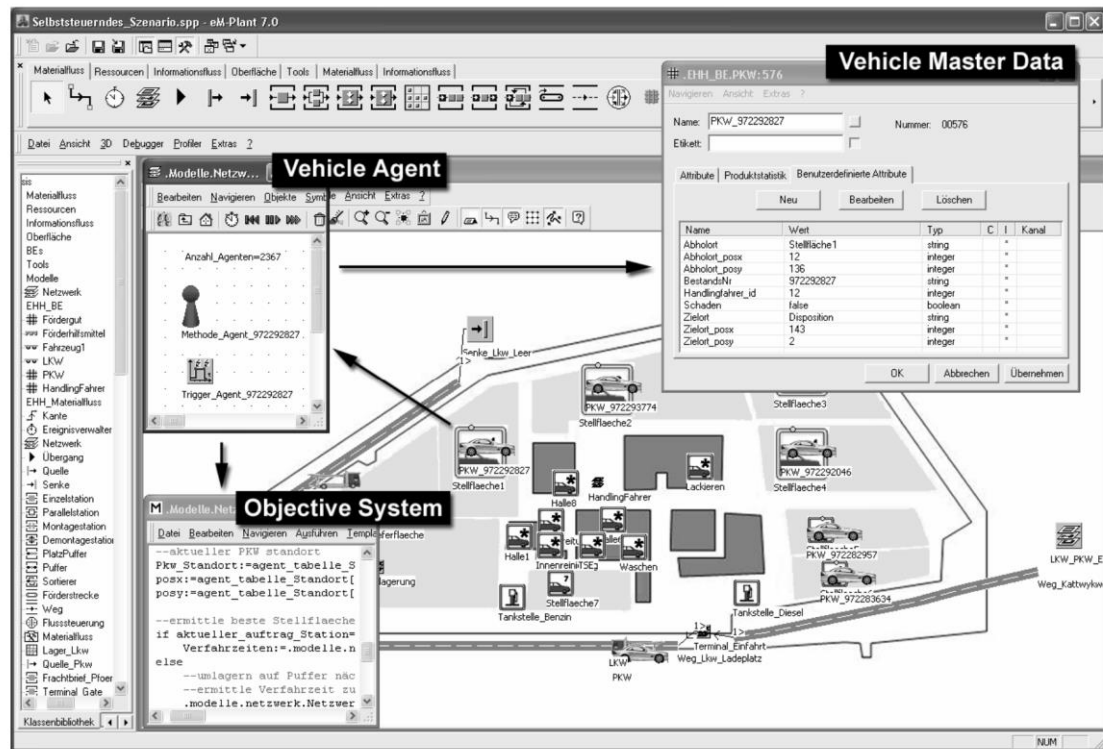
Ilustración 255. Comparación de resultados entre un sistema convencional "C" y otro autónomo "A" en el modelo de una terminal de automóviles.



Fuente: Böse y Windt (2007).

Para el modelo utilizaron el software eM-Plant (Tecnomatix, 2006), ahora conocido como Plant Simulation (Wikipedia – PS, 2017) y que consiste en una herramienta hoy comercializada por Siemens PLM Software³³⁷ que permite modelar, simular, analizar, visualizar y optimizar procesos productivos, flujos de materiales y operaciones logísticas (Siemens, 2017) (ilustración 256).

Ilustración 256. Modelo eM-Plant para gestión autónoma de una terminal de vehículos.



Fuente: Böse y Windt (2007).

Estos autores seguirán con sus investigaciones sobre sistemas autónomos en el campo de la logística (no específicamente centrados en las terminales de automóviles) en Windt *et al.* (2008).

Continuando con los estudios que dentro del sistema portuario Chino se centraban en terminales de vehículos, en un primer estudio Zhang *et al.* (2009a) investigan cual es la mejor estrategia de

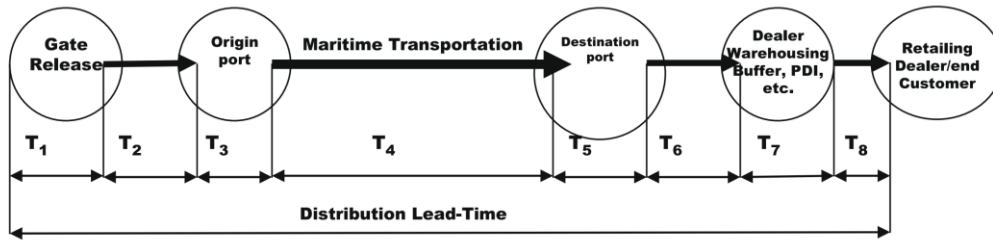
³³⁶ Imagen descargada de [fecha de último acceso el 01.10.2017] <https://www.abendblatt.de/hamburg/harburg/article131735148/Die-Insel-der-Autos-im-Hamburger-Hafen.html>.

³³⁷ Conforme se puede ver en Wikipedia - PS (2017), los orígenes de eM-Plant se remontan al año 1986 cuando la *Fraunhofer Society for Factory Operation and Automation* desarrolla un programa de simulación orientado a objetos y jerárquico para Apple Macintosh bajo el nombre SIMPLE Mac. Este sistema va evolucionando primero a una versión que se conoce como SIMPLE++ (1990) y renombrado como eM-Plant (1997) cuando la empresa Tecnomatix Ltd compra sus derechos a la que entonces era su propietaria (AESOP). Finalmente en el año 2005 pasa a denominarse Plant Simulation después de compra del producto por parte de Siemens.

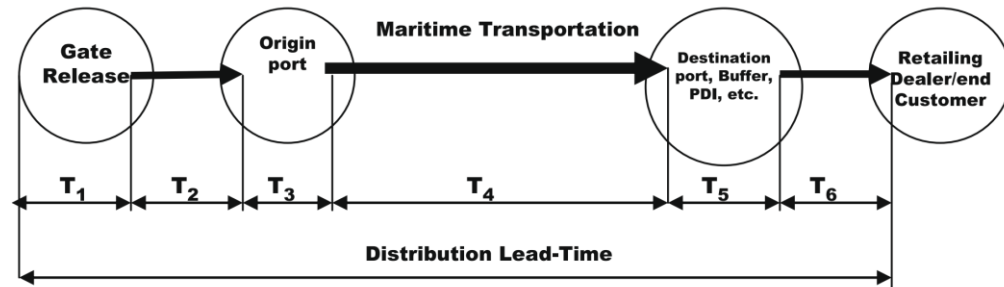
programación con el objetivo de mejorar la eficiencia de las operaciones en la explanada (tratando de mejorar el rendimiento global de la misma), para en una segunda investigación recogida en Zhang *et al.* (2009b) desarrollar un modelo para la programación de *slots* en la zona de aparcamiento de este tipo de terminales en un ambiente en el que los mismos son muy limitados (restricciones de capacidad).

Dias *et al.* (2010) investigan el *role* que las terminales de vehículos en Europa toman en la cadena de suministro de estos bienes. Estos autores tratan de definir una red funcional que mejora la integración del modo marítimo en las redes de distribución de coches proporcionando una novedosa visión sobre el proceso de distribución en el que los puertos toman otra dimensión y en la que se toma especial foco de atención al SSS. Estos autores no estudian procesos de transbordo y se centran en analizar cómo ha impactado en el mercado las políticas de minimización de *stocks* y retrasos en la fabricación de bienes hasta que se produce la orden de compra del cliente final (fabricación bajo demanda) analizadas en detalle por Skipworth y Harrison (2006) y en la que los puertos se configuran como verdaderas plataformas de distribución finales antes de la entrega del vehículo al cliente (minimizando además su estancia en puerto). Así presentan dos gráficas una primera en las que se analiza la tradicional cadena de distribución en el sector del automóvil (ilustración 257) y una segunda en la que se incluye la nueva organización de dicha cadena (ilustración 258) y en la que, como se observa, desaparece un depósito intermedio entre el puerto de destino y el concesionario o cliente final y, el vehículo se despacha directamente desde las instalaciones portuarias.

Ilustración 257. Cadena logística tradicional en el sector del automóvil.



T ₁	hold-up time until gate release in the automotive plant assembly plus the time for the handling operations necessary for land transportation (rail or road)
T ₂	transit time between the gate release and the port terminal including the time for handling operations in the port terminal
T ₃	hold-up time in the terminal of origin plus the time to board cars on plus hold-up time for the vessel to exit from port
T ₄	maritime transit time between origin and destination ports including the time for the cars to board off in the destination port terminal
T ₅	hold-up time in the destination terminal plus handling operations to land transportation
T ₆	transit time to distribution centre and handling operations time
T ₇	hold-up time in the warehousing centre that includes transit time and PDI (Pre-Delivery Inspection) operations time, postponement time, etc.
T ₈	the transit time to dealer and delivery time to end customer

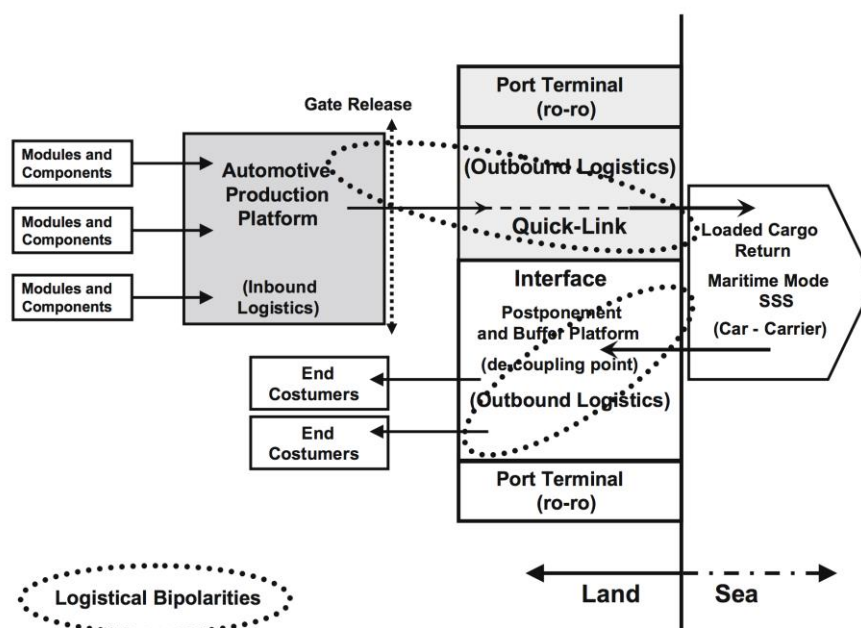
Fuente: Dias *et al.* (2010).Ilustración 258. Nueva cadena logística en el sector del automóvil según Dias *et al.* (2010).

T ₁	hold-up time until gate release in the automotive plant assembly plus the time for the handling operations necessary for land transportation (rail or road)
T ₂	transit time between the gate release and the port terminal including the time for handling operations in the port terminal
T ₃	hold-up time in the terminal of origin plus the time to board cars on plus hold-up time for the vessel to exit from port
T ₄	maritime transit time between origin and destination ports including the time for the cars to board off in the destination port terminal
T ₅	hold-up time in the destination terminal plus handling operations to land transportation
T ₆	the transit time to dealer and delivery time to end customer

Fuente: Dias *et al.* (2010).

De esta manera se consigue eliminar lo que estos autores definen como bipolaridades logísticas integrando de una manera más relevante la terminal portuaria en el proceso de distribución (ilustración 259).

Ilustración 259. Integración del modo marítimo en la cadena de logística del automóvil.

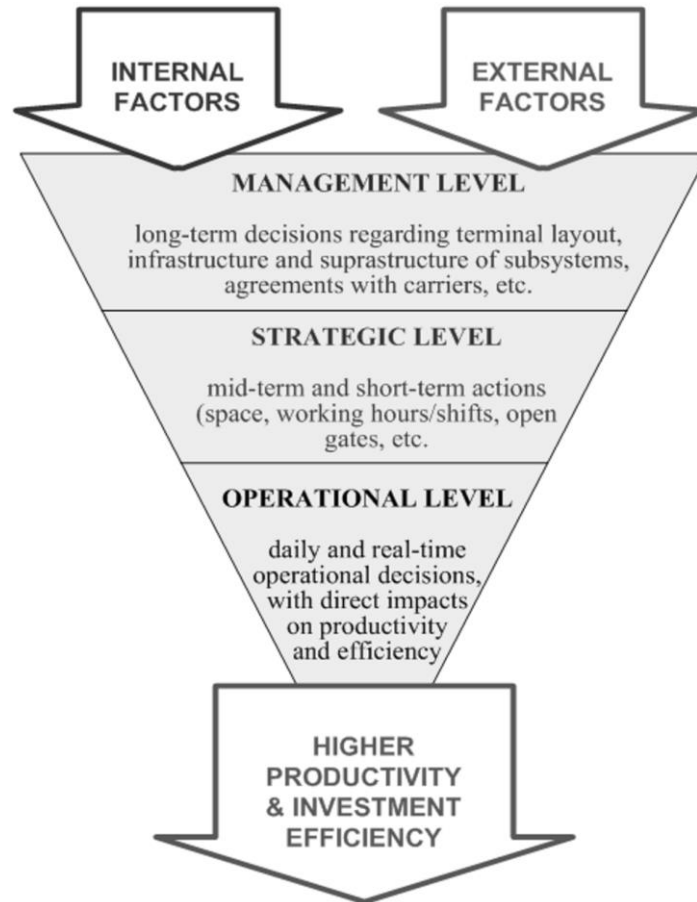


Fuente: Dias *et al.* (2010).

Beškovnik y Twrdy (2011) escogen en su investigación las terminales de automóviles del Norte del Adriático para estudiar posibles medidas de mejora de la productividad en las mismas. Presentan un DDS de tres niveles de actuación en la que el modelo actúa tanto en el corto, como en el medio y en el largo plazo. Basan sus estudios en el modelo desarrollado por D.M. Lambert (Lambert, 2001). Las estrategias de largo plazo (que estos autores llamaran *management level* en la ilustración 260) tienen que ver con decisiones sobre las infraestructuras necesarias, óptimo *layout* del puerto, modernización de la superestructura o mantenimiento de las instalaciones. De igual modo, en este apartado, se engloban también las decisiones comerciales, relaciones con los *car carriers* o acuerdos con las empresas fabricantes. Las estrategias a medio plazo (*strategic level* para los autores) se centran en cómo deben optimizarse las instalaciones existentes (políticas de uso de las infraestructuras) y qué medios deben disponerse en ellas (fundamentalmente, en términos de trabajadores / horas de trabajo). Por último, el corto plazo (*operational level*) tiene que ver con las decisiones en el día a día, es decir, decisiones en tiempo real sobre cómo realizar cierta operación a la llegada de un buque (donde disponer los vehículos que se descargan por ejemplo) o donde atracar un buque que llega a puerto. Estos investigadores inciden en la necesidad de que al más alto nivel se analicen todas las variables (internas y externas) de la terminal y que

existan procedimientos adecuados para que la información fluya convenientemente entre los tres estadios de planificación.

Ilustración 260. Esquema jerárquica de planificación en una terminal de vehículos.



Fuente: Beškovnik y Twrdy (2011).

4.4.3 Terminales de *ferries* y cruceros.

Unas terminales con claras similitudes a las que se acaban de analizar (terminales Ro-Ro de mercancía o vehículos) son las terminales de *ferries* y cruceros.

En las primeras podría indicarse como característica especial la necesidad de cumplir unos programas de operación muy ajustados que suelen responder a una altísima regularidad del servicio en las que el ferry conecta en una secuencia circular dos puntos del litoral, bahía o río.

Además, en las terminales de ferries la convivencia de tráficos de vehículos que utilizan el servicio, manejados por sus propietarios y no por trabajadores especializados, introducen un elemento a tener en cuenta en las operaciones.

De igual modo, en las terminales de ferries pero, más especialmente en las de cruceros por el volumen de pasajeros que se pueden movilizar, la entrada en el modelo del comportamiento humano en el embarque y desembarque, es sin duda el elemento esencial.

Desde esta perspectiva parece que los modelos de tipo microscópico y técnicas de simulación ABS estarían especialmente prescritas.

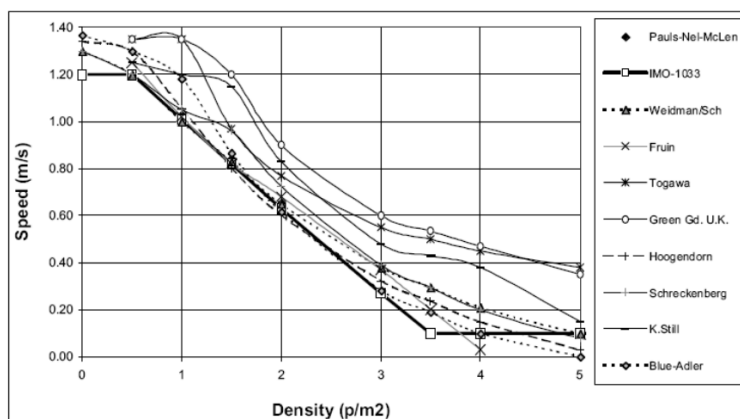
A pesar de la relevancia de este tipo de terminales (la de ferries por su importancia en determinados sistemas de transporte y la de cruceros por su creciente influencia en las estrategias de determinadas ciudades portuarias) se han encontrado muy pocos trabajos que aborden esta temática y salvo casi anecdóticas realizaciones los ejercicios de optimización y modelización se han circunscrito a estudiar los procesos de evacuación de buques en el caso de eventos catastrófico (peligro de hundimiento, fuego, ataque, etc...).

Pérez (2008), realiza una buena explicación sobre los antecedentes de este tipo de estudios y su aparato matemático. Conforme este autor, el problema de la evacuación es en esencia un problema de transporte el cual fue formulado por primera vez en Hitchcock (1941). Su desarrollo se ha centrado más al ámbito de la planificación urbana y arquitectura (evacuación de centros de ocio, edificios, etc...) y sus avances determinados por la investigación de eventos catastróficos y las causas que lo produjeron, destacando en este sentido el análisis de Chertkoff y Kushigian (1999) quienes analizan un conjunto de situaciones reales y determinan las similitudes que produjeron los fallos en todos estos eventos.

Estas técnicas se basan en la modelización del comportamiento de peatones y su proceder en las colas y situaciones de congestión. Estos modelos han sido desarrollados dentro del campo de la planificación urbanística. Como realizaciones muy destacadas en este campo no portuario podrían citarse a Okazaki (1979a, 1979b y 1979c), Matsushita (1992) y Okazaki y Matsushita (1993), autores en las que se han inspirado muchos estudios posteriores (entre ellos algunos que van a ser citados a continuación).

En la confección de estos modelos deben estudiarse las rutas de salida / desembarque y para ello el parámetro fundamental es la distancia y la velocidad de desplazamiento horizontal de las personas que en situaciones de movimiento libre (sin congestión) puede alcanzar 1,2-1,4 m/s pero que desciende rápidamente en función de la densidad de personas, colapsándose y tendiendo a cero cuando el número de personas es aproximadamente 5 personas/m² (ilustración 261).

Ilustración 261. Velocidad de desplazamiento horizontal de las personas según diversos investigadores.



Fuente: Pérez (2008).

La incorporación de este tipo de estudios al contexto marítimo portuario tuvo lugar de una manera limitada a mediados de los años 90, impulsándose mucho en la década de los 2000, fundamentalmente por la constitución de un grupo de investigación británico conocido como el *Fire Safety Engineering Group*, quien liderado por su director (Profesor E.R. Galea) realizan muchos trabajos prácticos (fuera y dentro de ambientes portuarios). Dicho grupo cuentan con un modelo propio (Exodus) que permite realizar este tipo de estudios de una manera sistemática.

Dentro de las realizaciones de este grupo en ambientes marítimo-portuarios destacan las de Galea y Owen (1994) que realizan un primer trabajo de evacuación en sistemas de transporte en masa, centrándose en eventos de incendios en buques; Glen y Galea (2001) que analizan los cambios que a la fecha se están produciendo en el análisis de este tipo de estudios y describen qué herramientas están disponibles; Galea *et al.* (2001, 2002a, 2002b, 2003a, 2003b, 2003c y 2004) y Caldeira-Saravia *et al.* (2004), que avanzan en la introducción de manera implícita de la simulación en este tipo de análisis; Boxall *et al.* (2005) que siguen con los trabajos de sus colegas pero se centran en aplicaciones de tipo militar estudiando el modelo de respuesta en la evacuación de buques en situaciones de guerra naval, Deere *et al.* (2006) que analizan el impacto de la distribución del tiempo de respuesta de los pasajeros en los procesos de evacuación; Deere *et al.* (2008) que por primera vez se ocupan de la evacuación de buques en operaciones normales y no de emergencia, haciendo énfasis en el comportamiento humano en estos escenarios; Galea *et al.* (2012a y 2012b) que vuelven a poner el foco en el comportamiento humano en este tipo de eventos accidentales y, por último, en fechas más recientes los de Brown *et al.* (2012a, 2012b, 2012c, 2012d y 2013) que analizan la respuesta de los pasajeros en grandes buques de cruceros y pasajeros en situaciones de emergencia y evacuación realizando recomendaciones a la IMO (*International Maritime Organisation*) en el diseño de este tipo de embarcaciones.

Otro grupo que también ha investigado activamente este tema es el de Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid (España). Este grupo desarrolla un proyecto propio bajo el acrónimo SIFBUP (*S*IMulación del *F*lujo de personas y vehículos en

BUques de Pasaje), que es desarrollado en conjunción con los astilleros de IZAR (hoy Navantia) y Transmediterránea y presentado por primera vez en López y Pérez (2003a).

Las realizaciones más destacadas de este grupo son los trabajos de Pérez y López (2001 y 2003), López (2002, 2005), López y Pérez (2002, 2003a y 2003b), López *et al.* (2004, 2005), Pérez *et al.* (2005), Pérez (2008), Cosma *et al.* (2013), destacando a nuestro entender la tesis doctoral incluida en López (2005) tanto por su extensión como por el estudio previo y de documentación que realiza y la extensa descripción del modelo que utiliza (del cual incorpora una experiencia práctica en el campo de buques militares).

Sin embargo, estos dos grupos no son los únicos que han desarrollado una línea investigación centrada en la modelización de situaciones de desembarque. Entre otros autores podrían citarse a Brumley y Koss (2000), que estudian la influencia del factor humano en la evacuación de ferris y cruceros, König *et al.* (2002) que estudian los procesos de evacuación en buques de pasajeros bajo un enfoque de simulación microscópica, Marón *et al.* (2002), del Ministerio de Defensa de España (Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo situado en Madrid, España), que presentan un resumen de las necesidades e investigación realizada hasta la fecha en las técnicas de evacuación de buques de pasaje; Boulougouris y Papanikolaou (2002) quienes también modelizan la evacuación en buques de pasaje y Yoshida *et al.* (2002) que abordan el mismo problema.

Ya en la presente década cabe citar a Wang *et al.* (2014) quienes primero realizan un modelo que luego validan con ejercicios y datos experimentales; Balakhontceva *et al.* (2015) quienes introducen un interesante modelo MAS en este campo; y Popara y Strer (2016) que se recogen a continuación con un mayor grado de detalle.

Popa y Strer (2016), explican como a consecuencia del ataque a las torres gemelas en el año 2001, los controles de seguridad se intensificaron especialmente en las terminales aeroportuarias pero también en las marítimas, estableciéndose la obligación de elaborar planes de protección conocidos hoy en día como planes PBIP (Plan de Protección de Buques e Instalaciones Portuarias) en literatura española e ISPS Code (*International Ship and Port Facility Security code*) en literatura anglosajona³³⁸. Para estos investigadores, estos planes se han venido implantando con rigor en las terminales de cruceros pero no tanto en las de ferries que presentan a la fecha un mayor riesgo o vulnerabilidad a ataques terroristas.

El objetivo de su trabajo es evaluar las repercusiones operativas en la implantación en las terminales de ferries de un nivel de control similar al que se lleva a cabo en las terminales de aeropuertos incluyendo chequeos de seguridad con rayos-X para pasajeros y sus equipajes,

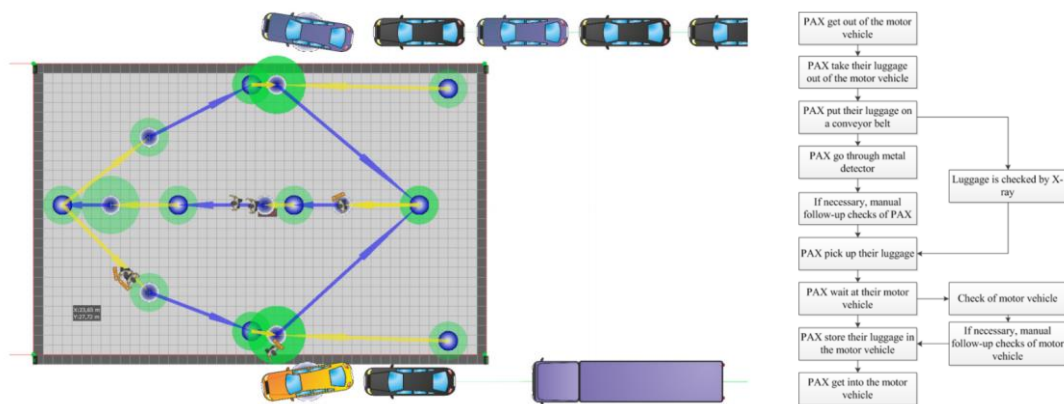
³³⁸ Herramientas incorporadas el 12.12.2002 al capítulo XI-2 del Convenio SOLAS (*convention for the safety of life at sea*).

empleados y vehículos, inspecciones de los fondos de vehículos con espejos, etc. (ilustración 262).

Para conocer el impacto que estas medidas tendrían en la operación realizan un modelo microscópico para ver la respuesta del sistema a estos nuevos protocolos. Los resultados del modelo se evalúan en términos de tiempos de espera en los puntos de control de seguridad, longitud de las colas y número de pasajeros que eventualmente perderían el ferry por razones de esta inspección.

Los resultados de su estudio revelan que de implantarse tales medidas se afectaría de una manera muy relevante la operación tal y como hoy la entendemos. Desde el punto de vista de la herramienta utilizan el modelo TOMICS (*Traffic Oriented Microscopic Simulator*) modelo que fue ideado en un principio para su explotación en terminales de aeropuertos pero que estos autores exportan al contexto portuario a una terminal de ferries de Alemania (sin especificar cuál). En esta terminal aplican las reglas de seguridad conforme la ley de Seguridad en la Aviación de Alemania y alimentan el modelo con datos reales de llegada de pasajeros y vehículos así como de composición de la flota de vehículos (coches y camiones).

Ilustración 262. Ejemplo de punto de inspección de seguridad y procedimiento de inspección en una terminal de ferries.



Fuente: Popa y Ster (2016).

Mangan *et al.* (2002) son los primeros autores que analizan las terminales de ferries abandonando la línea anterior de desembarque del pasaje y aportando otro enfoque. Como primera contribución realizan una revisión bibliográfica de los estudios publicados en este tipo de terminales intentando caracterizar sus peculiaridades y elementos esenciales para, en una segunda fase e inspirados en trabajos de autores anteriores³³⁹, abordar el análisis de los criterios que los usuarios de estas

³³⁹ Dentro de estos estudios anteriores cabe citar a McGinnis (1979), Gray (1982), Slack (1985), Brooks (1990 y 1995), Murphy *et al.* (1992), Matear y Gray (1993) y Murphy y Hall (1995).

instalaciones pueden manejar para la selección de un puerto / terminal de ferries frente a otro. Estos autores utilizan una metodología de investigación por triangulación.

El método de investigación por triangulación (*triangulated research methodology* o simplemente *triangulation* en literatura en inglés) es una técnica que permite validar los resultados de un experimento a través del cruce de dos o más fuente de datos, metodologías o equipos de investigación que trabajan independientemente. Este concepto es tomado de la topografía clásica. En este campo la triangulación lleva a tomar las coordenadas de un punto por dos caminos distintos viendo si los dos resultados son similares (desviaciones menores que un determinado estándar) o existen diferencias que obligan a repetir las mismas (o simplemente a repartir los errores). Suele aplicarse en toda clase de ciencias sociales bien realizando el mismo experimento por varios investigadores (triangulación de investigadores), aplicando diferentes teorías (triangulación de teoría), diferentes métodos (triangulación metodológica) o usando dos o más fuente de datos (triangulación de datos)

En su ejercicio emplean tanto procedimientos cuantitativos como cualitativos.

El método cualitativo utilizado es el “*construct elicitation*”³⁴⁰ (Burge, 1988) que según Mangan *et al.* (2002) es la primera vez que se utiliza en este contexto científico. Dado que el método tiene limitado interés a los efectos de esta tesis no se entrará en su detalle.

Los dos métodos cuantitativos utilizados son una modelización orientada a los *inputs* (*input-oriented modelling*) y una modelización orientada a los procesos (*process-oriented modelling*).

Su base experimental son líneas de ferries que conectan Irlanda con el Reino Unido e Irlanda con determinados puertos de Europa.

Merrick *et al.* (2003) hacen un interesante ejercicio de simulación para evaluar los efectos en el tráfico marítimo y evaluar posibles eventos de congestión como consecuencia de un plan para la expansión del servicio de ferries en la Bahía de San Francisco (San Francisco, Estados Unidos). Este servicio atiende el transporte de personas y vehículos en la Bahía y era una preocupación para las Autoridades Marítimas el poder llegar a situaciones de riesgo por la ampliación de las frecuencias. Así, el modelo trata de evaluar el incremento en las interferencias entre las rutas de

³⁴⁰ El método *Construct Elicitation* es usado en ciencias sociales para obtener información sobre como diferentes expertos discriminan entidades en un problema. Estos métodos fueron introducidos por J.E. Kelly (Kelly, 1955) bajo una primera variante conocida como *Repertory Grid Analysis*, siendo a la fecha el método más utilizado (Burge, 1988). En este método se le presenta al experto una lista de entidades y se le pide que reporte sobre las semejanzas y diferencias entre ellos, resultado que es utilizado para conocer la importancia de los atributos de las entidades. Existen otros métodos como el *multi-dimensional scaling* (Kruskal, 1964 y Young, 1987) o el *proximity scaling* (Hudlicka, 1996 y 1997), en el que además de atributos y entidades entran en juego las relaciones. Una actualización sobre estos métodos se puede encontrar en Epting (2007).

los buques entre el estado actual y el futuro estado de aprobarse dichas medidas de expansión. Se trata de un modelo que además se usaría en la elaboración y diseño de planes de emergencia y contingencia y englobado, por tanto, en un grupo de modelos con fines de seguridad.

4.5 Terminales polivalentes: multipropósito y de carga general fraccionada.

4.5.1 Caracterización de terminales polivalentes. Terminal multipropósito *versus* terminal especializada.

No cabe duda que en los últimos años la búsqueda de mayores productividades en los puertos ha llevado a la proliferación de terminales especializadas. No obstante, las terminales polivalentes o multipropósito u otras dedicadas a mercancía general convencional de diversa naturaleza son todavía terminales muy habituales.

En las de mercancía general convencional, toda la mercancía se puede clasificar como carga general pero pueden manipular productos en diversas formas de presentación (bovinas, pallets, piezas especiales, etc...) (ilustración 263).

En las terminales multipropósito se mueven todo tipo de productos, desde graneles sólidos a contenedores, pasando por tráfico Ro-Ro o mercancía general convencional (ilustración 264 a ilustración 266).

Ilustración 263. Variabilidad de tráfico y formas de manipulación en una terminal polivalente.



Ilustración 264. Terminal Multipropósito Dradenau (Hamburgo, Alemania).



Ilustración 265. Terminal Multipropósito de Wilhelmshaven (Wilhelmshaven, Holanda) .



Ilustración 266. Terminal Multipropósito del Puerto de Santa Marta (Colombia).



Un análisis de este tipo de terminales lo lleva a cabo Enríquez (1991), trabajo que este autor realiza para la UNCTAD y que trata monográficamente las terminales polivalentes incluyendo recomendaciones de tipo cualitativo para el diseño y gestión de las mismas. Efectivamente, sus recomendaciones abarcan tanto aspectos de tipo infraestructural (tipo de muelles, *lay-out* de

explanadas, almacenes, entradas a la terminal, etc...), como de equipamiento (clases y criterios de selección de grúas y medias de transporte horizontal por ejemplo).

Otros enfoques de tipo cuantitativo son los que se recogen en UNCTAD (1973 y 1986); Hockney (1979) y Hockney y Whiteneck (1986), y más recientemente Park *et al.* (2014).

Estos son, sin embargo, enfoques analíticos de tipo determinista y es que, en la diversidad de los tráficoes que se mueven por dichas terminales es donde reside la dificultad de abordar ejercicios de simulación como los que se han venido revisando para estas terminales.

En efecto, a la naturaleza dinámica y estocástica de los procesos de llegada de buques y tiempos de servicio en cualquier terminal portuaria, hay que añadir una nueva componente de incertidumbre: la variabilidad de la mercancía a manipular.

Al margen de esto, las políticas y estrategias de operación pueden variar mucho de unas terminales dedicadas a otras, al igual que pueden hacerlo su tamaño y otro tipo de características que hacen que las terminales multipropósito sean, en general, mucho más heterogéneas que las especializadas.

En efecto, se encuentran terminales polivalentes de un solo atraque o de varios atraques; terminales con reglas de asignación de atraques muy diferenciadas (por ejemplo dar prioridad a un determinado tipo de tráfico como pueden ser mercancías peligrosas o perecederas o prioridades por el tipo de servicio, habitual por ejemplo en tráficoes regulares) o sin reglas de asignación; terminales donde las explanadas están separadas en unidades independientes de explotación (es decir donde las explanadas se dividen en áreas y en cada uno de ellas se deposita un tipo de mercancía) o donde la mercancías se deposita indistintamente; terminales con almacenes cerrados y sin ellos, etc.³⁴¹

Este problema es además complejo en naturaleza porque cada mercancía puede requerir equipamiento diferente y los tiempos de servicio y rendimientos también pueden obedecer a diferentes distribuciones estocásticas, con lo que la dificultad matemática se incrementa.

Es por ello que, históricamente, los ejercicios de planificación en estas terminales se han basado más en procedimientos analíticos como los que se veían con anterioridad que en ejercicios reales de modelización.

Este hecho fue puesto de manifiesto por Ashar y Ayzanoa (1995) quienes exponen las fortalezas y debilidades de los procedimientos analíticos *versus* las aproximaciones de simulación y, tras

³⁴¹ Véanse nuevamente las ilustración 264 a ilustración 266 donde se puede apreciar esta segmentación en diferentes áreas con diferentes productos

determinar las dificultades de aplicación de estos últimos en este tipo de terminales, y reconocer las limitaciones de los primeros que incluyen gran número de simplificaciones, proponen un método intermedio entre ambos sistemas que denominan metodología de *stock* y flujo y que aplican de manera práctica para desarrollar el Plan Intermodal del Estado de Louisiana (Louisiana, Estados Unidos), donde aplicaron la metodología en un conjunto de más de 50 terminales marítimas y ferroviarias.

Desde el punto de vista de la modelización y optimización por simulación, los modelos de naturaleza microscópica son verdaderamente escasos en este campo, encontrando algunas realizaciones con un enfoque más macro que a continuación se describen, como viene siendo habitual, mediante un recorrido histórico.

4.5.2 Modelización en terminales multipropósito y de carga general.

Erikson (1981) presenta un completo estudio sobre las operaciones de recepción, almacenamiento y carga en una terminal de exportación de carga general. En este primer ejercicio, la principal simplificación es considerar una estructura de tráficos constante (1 barco por semana) que se carga en un único puerto y que se dirige a tres puertos de destino diferentes. El autor presenta resultados en términos del coste unitario de manipulación, rendimiento de las operaciones por mano de trabajadores y ratios de utilización de equipamiento y personal. El modelo, del que se proporciona extensivos listados con comentarios, se puede utilizar para chequear diferentes alternativas y con ello encontrar el óptimo equipamiento para una configuración dada o comprobar distintas configuraciones con idéntico equipamiento.

Noritake y Kimura (1983b)³⁴² estudian la mercancía general manipulada en diferentes muelles públicos de un sistema portuario. Para estos autores, la cantidad de mercancía fluctúa en función de determinadas variables como son la propia economía nacional, la localización del puerto (en relación a otros del sistema), su hinterland y las prácticas comerciales de la zona de influencia del puerto. En este contexto de demanda variable, el trabajo de estos autores trata de determinar de una manera sencilla y rápida el número óptimo de muelles en el sistema proponiendo como principal resultado de su investigación unas curvas de óptima capacidad de muelles que han venido siendo usadas por diferentes estudios posteriores.

El primero de los autores sigue la investigación en muelles de carga general y en Noritake (1985) estudia los precios en estas infraestructuras y los costes que introduce la congestión en los mismos. Este autor, apoyándose en la teoría de colas, analiza las consecuencias económicas e ingenieriles de la congestión portuaria, con las externalidades que esto produce y propone unas

³⁴² Este artículo es objeto de la publicación de una fe de erratas por la propia publicación (ASCE, 1984).

preliminares fórmulas con las que tratar el grado de ocupación óptima de este tipo de muelles con el objetivo de poder asegurar un precio adecuado por la utilización de los mismos.

Buxton y Akgul (1989) realizan una comparación de los resultados económicos de un barco de mercancía general usando técnicas de simulación, resultando por lo tanto una investigación más en el área del transporte marítimo (*shipping*) que del campo puramente portuario. Para estos autores los diseños de barcos varían en cuanto a sus características (dimensiones, velocidades, consumos y equipamiento). En función de las condiciones del mercado de fletes, el escenario energético (coste de los combustibles para *bunkering*) y la demanda de transporte puede ser preferible uno u otro tipo de buque, es decir, con unas u otras características. Su modelo evalúa y compara mediante simulación un conjunto de seis buques multipropósito para un armador turco. Con su modelo se simulan las condiciones de operación de cada uno de los barcos analizados en diferentes escenarios de operación (variación de precios de fuel y del precio de fletes) a lo largo de la vida útil del buque estimando el valor presente neto de la inversión en cada caso como *proxy* para comparación de proyectos. En su modelo los barcos presentan condiciones variables en dimensiones, velocidad, valor de inversión, consumos, capacidad de carga y tiempo de operación en puerto. Ofrece resultados sobre un conjunto de buques de 20.000 toneladas de peso muerto realizando una recomendación en base a los resultados del modelo.

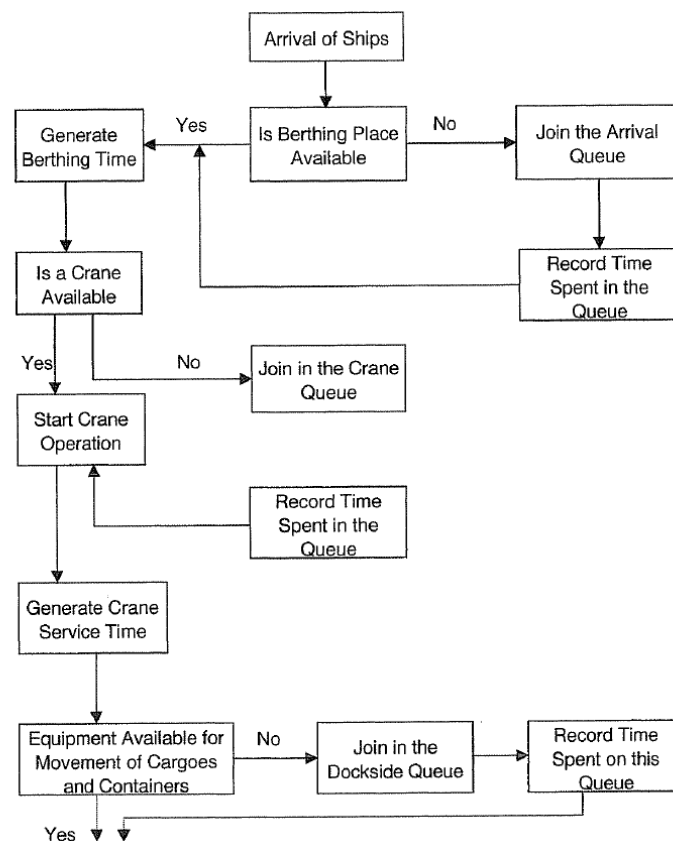
Daganzo (1990b) estudia el caso particular de una terminal multipropósito en la que también opera una línea regular de contenedores. Como estrategia de operación del puerto, los barcos que sirven esta línea tienen prioridad de atraque (en consideración de la regularidad del servicio) mientras que el resto de barcos llegan de manera aleatoria atracando siempre que no exista conflicto con los anteriores (atraque libre durante todo el periodo en el que se prevé que este barco permanezca atracado). En su estudio, se analizan las colas que se producen en la terminal y tiene como objetivo proponer tras los ejercicios de simulación una fórmula empírica de evaluación de la capacidad de dichas terminales. Como resultado de su estudio se proporciona una formulación determinista exacta para el caso particular en el que la llegada de los buques de contenedores es regular, el de otros barcos es aleatoria y los tiempos de servicio son constantes (sistemas del tipo D/D/n y M/D/n en notación Kendal).

Noritake y Kimura (1990) en un estudio que es, en parte, continuación de Noritake y Kimura (1983a y 1983b) y Noritake (1985), estudian cual es la localización y el tamaño óptimo de un puerto desde el punto de vista macroeconómico. Para ello consideran el tráfico de mercancía general a escala regional y nacional. Su modelo tiene en cuenta el coste total del transporte, tanto en su componente terrestre (desde los puntos donde la carga se genera hasta los puertos) como el propio coste portuario. Los autores consideran que mientras la primera es una función lineal con la cantidad de carga transportada, la segunda (coste portuario) no se puede representar mediante una función lineal.

Faghri y Wahed (2002) realizan un completo trabajo de simulación mediante computador para optimizar la operación de un puerto multipropósito. Estudian como caso experimental el puerto de Wilmington (Delaware, Estados Unidos). En su análisis se ayudan del software Promodel bajo un esquema de programación en paradigma DES. En su trabajo estos autores utilizan una técnica de generación de escenarios bajo una metodología “*what if*”. Para ello analizan los resultados que se obtienen en la simulación con diferente número de grúas, número de barcos que recalán a puerto y variabilidad en la carga de cada barco, diferentes opciones de operación en camiones o ferrocarril, etc... En base a los escenarios generados proponen cuáles son los cambios en la configuración del puerto y las estrategias de operación que producen unos mejores resultados.

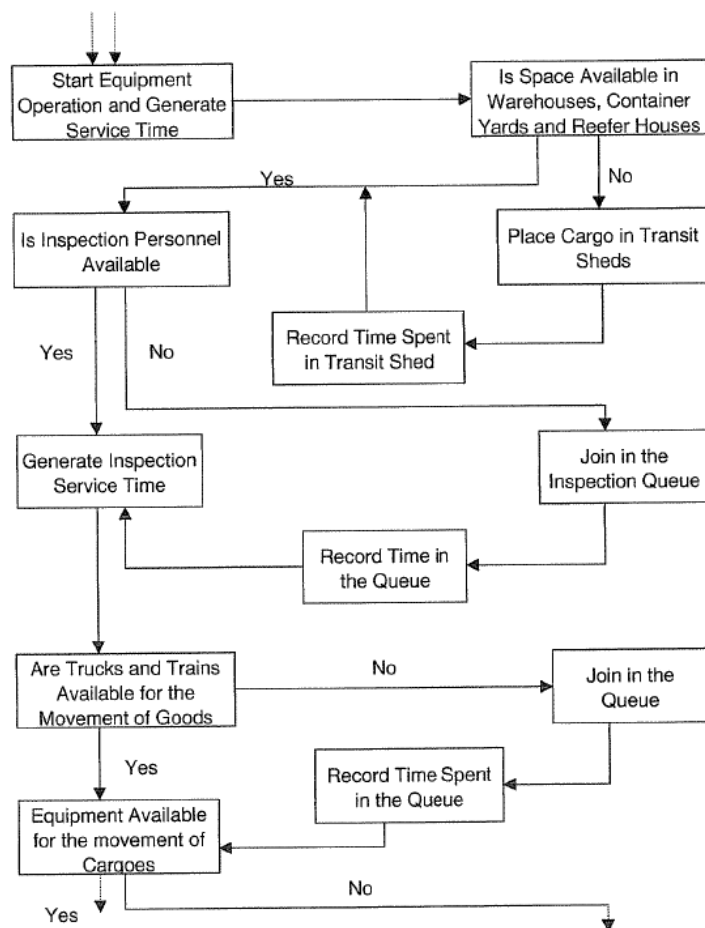
Para ayudar a comprender el modelo estos autores incorporan una serie de ilustraciones con el flujograma del proceso de importación (ilustración 267 a ilustración 269) y exportación de mercancía (ilustración 270).

Ilustración 267. Flujograma del proceso de importación en una terminal multipropósito. (figura 1 de 3).



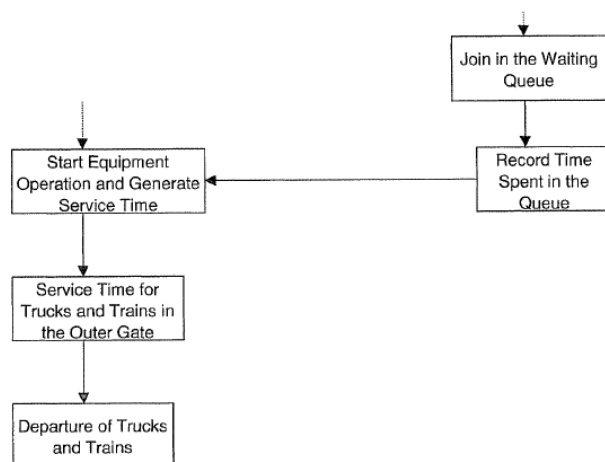
Fuente: Faghri y Wahed (2002)

Ilustración 268. Flujograma del proceso de importación en una terminal multipropósito según el modelo de Faghri y Wahed (2002) (figura 2 de 3, continua de la ilustración 267).



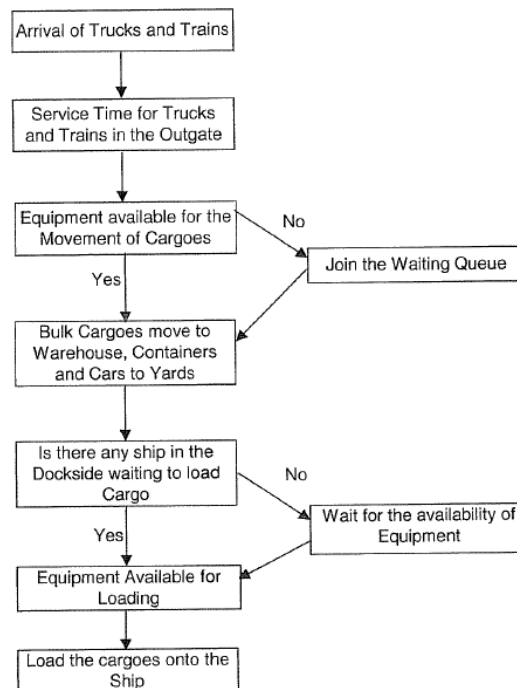
Fuente: Faghri y Wahed (2002)

Ilustración 269. Flujograma del proceso de importación en una terminal multipropósito (figura 3 de 3, continua de la ilustración 268).



Fuente: Faghri y Wahed (2002)

Ilustración 270. Flujograma del proceso de exportación en una terminal multipropósito.



Fuente: Faghri y Wahed (2002)

Analizados los principales cuellos de botella de la terminal, los autores definen cuatro escenarios ciertamente diferenciados, lo que a nuestro entender no facilita la comprensión de las medidas a tomar (al ser escenarios muy heterogéneos) pero que sí sirven a los objetivos de esta tesis (para ver qué tipo de variables pueden considerarse en un modelo de estas características).

El primer escenario, incorpora una grúa de contenedores y mantiene la misma llegada de buques; el segundo, incorpora dos grúas para los contenedores e incrementa la capacidad de los equipos de manipulación terrestre y la participación del tráfico ferroviario en un 10%; el tercer escenario, propone un incremento de la llegada de buques al puerto pero sin tomar medidas de inversión adicional; y, el último incrementa únicamente la capacidad de los almacenes de graneles en un 20%.

Para todos estos escenarios analiza el tiempo en el que son despachados los barcos y los movimientos anuales asociados a cada segmento de tráfico (granel, contenedor y Ro-Ro), resultados que a efectos ilustrativos se muestran en la

tabla 31 y donde se ponen de manifiesto ciertas interacciones no intuitivas entre los distintos tipos de tráfico.

Tabla 31. Comparación de resultados del modelo de Faghri y Wahed (2002) para evaluar una terminal multipropósito usando técnicas de escenarios “*what if*”.

		Scenario I	Scenario II	Scenario III	Scenario IV
BULK CARGO	YARD THROUGHPUT (Tons)	642,000	687,000	668,000	665,000
	SHIP TURNAROUND TIME (Hours)	29	26.5	33.5	27.2
CONTAINER CARGO	YARD THROUGHPUT (TEU's)	162,000	182,000	168,000	151,000
	SHIP TURNAROUND TIME (Hours)	20.8	16.2	25.5	21.1
RO-RO CARGO	YARD THROUGHPUT (Units)	72,000	68,000	85,000	70,000
	SHIP TURNAROUND TIME (Hours)	13.6	12	15	13.2

Fuente: Faghri y Wahed (2002)

Como era previsible los mejores resultados para el segmento de contenedores se logra con la inversión propuesta en el escenario II (que incide en dotar de más medios para operar este tráfico y considerar una mayor participación del tráfico ferroviario). Sin embargo, también se descubre que este escenario produce los mejores resultados en el segmento de tráfico a granel (tanto en capacidad de movimiento como en descenso del tiempo de despacho del buque) y en el tráfico Ro-Ro (en este caso sólo en lo que se refiere al tiempo de despacho de buques). Esto se debe, probablemente, a que la mayor productividad introducida en la operación de contenedores permite una mejor atención a los otros tráficos como efecto de segundo orden (al quedar muelles y medios disponibles).

Los mejores resultados en lo que se refiere a la capacidad global del tráfico Ro-Ro se produce sin embargo en el escenario III (incrementos globales del tráfico en el puerto llevan a alcanzar un mayor número de unidades movidas aunque sea a costa de producir los peores resultados en lo que se refiere a tiempo de despacho por la congestión que este incremento de tráficos genera).

Estos autores también concluyen como la introducción de una única grúa de contenedores (escenario I) si bien mejora algo los rendimientos de este tipo tráfico no produce ningún efecto significativo positivo en los otros.

Adicionalmente la mejora de los almacenes (escenario IV) aun produciendo mejoras en la parte de granel (inversión a la que va principalmente dirigida) introduce un efecto negativo en los otros

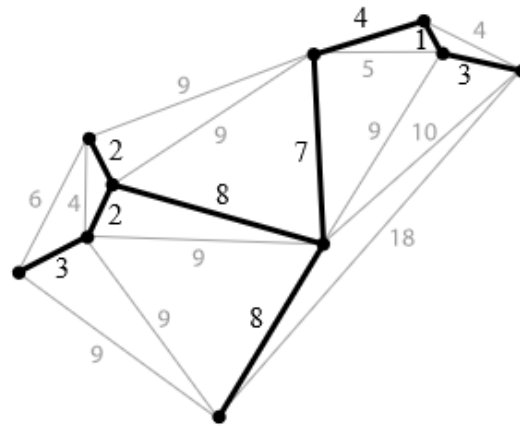
tráficos por los espacios que deben dedicarse a estos almacenes y que disminuye los puestos a disposición de otros tráfico (Ro-Ro y contenedores).

Önüt y Saglam (2008) estudian específicamente el proceso de carga y exportación de mercancía general en una terminal situada en el mar del Mármara en la costa de Turquía. El objetivo de este estudio es analizar los puntos críticos del sistema en aras de proponer medidas que incrementen el rendimiento del puerto aumentando la productividad de las operaciones de carga. Conceptualmente se define el estado actual de operación del puerto como el caso base sobre el que se identifican los factores que influyen en los ratios de carga. Utilizando técnicas estadísticas y simulación (tales como test de hipótesis y análisis de correlación) se optimiza el equipamiento portuario.

Desde el punto de vista computacional se usan técnicas de programación dinámica y herramientas del tipo *minimal spanning tree* o “MST” (traducido en español como “árbol recubridor mínimo”, “árbol de peso mínimo” o “árbol expandido mínimo”) que se integran con algoritmos tipo *fuzzy* para tener en cuenta las incertidumbres de los datos. Se ofrecen tanto los resultados del modelo como de un análisis de sensibilidad como un elemento más a considerar en la toma de decisiones.

Los sistemas MST son algoritmos que tratan de encontrar los recorridos de longitud mínima que conecten todo los vértices de un grafo. Se utiliza mucho en problemas de transporte y servicios urbanos buscando, por ejemplo, las rutas óptimas de un autobús urbano que debe visitar una serie de localizaciones y hacerlo utilizando el mínimo tiempo o, en el campo de distribución de servicios, la distancia mínima de cable o tubería que asegura que el suministro de electricidad o agua llega a un conjunto de poblaciones (ilustración 271).

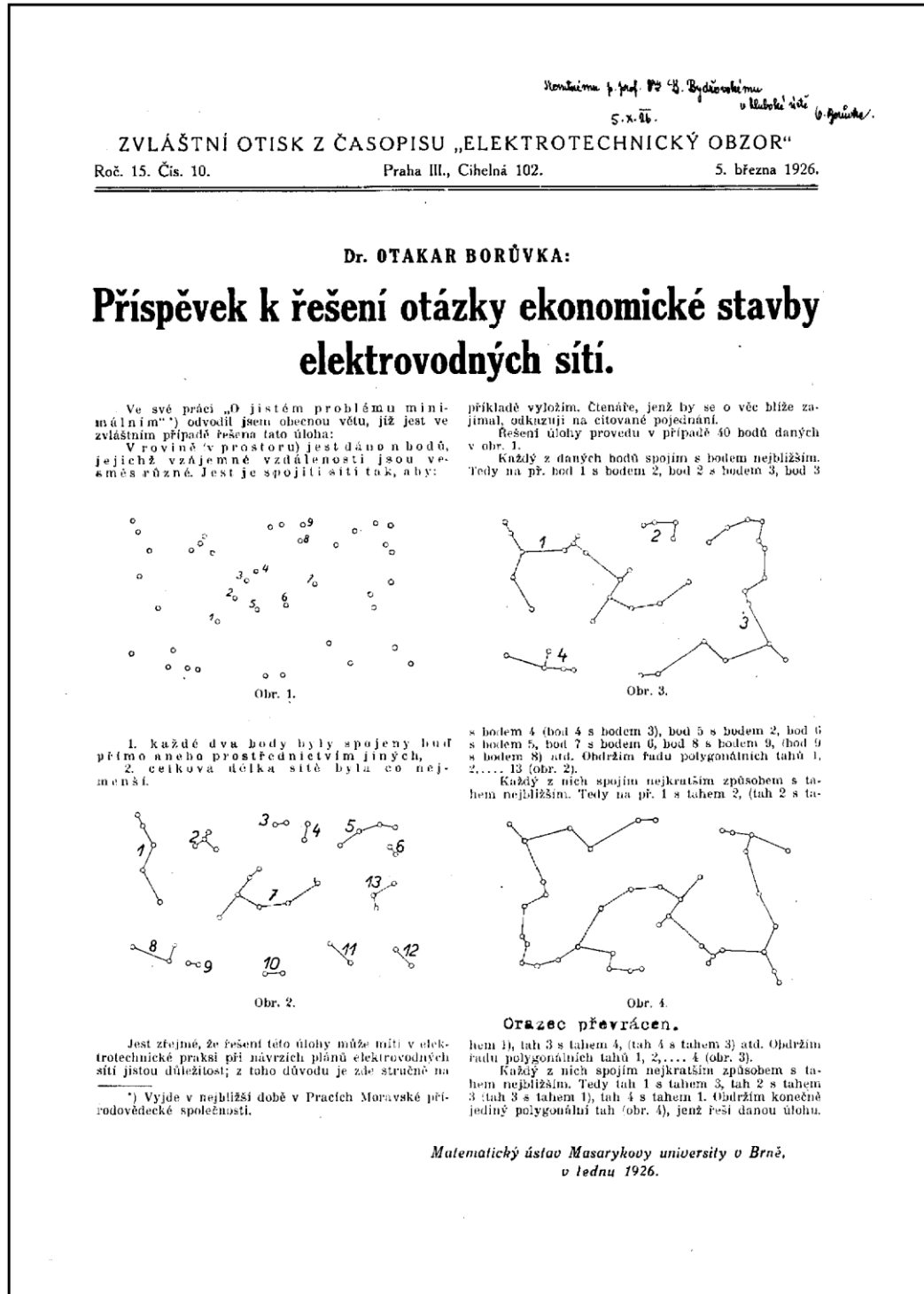
Ilustración 271. Triangulación para resolución del problema de árbol de peso mínimo (minimal spanning tree o MST).



Fuente: Öñüt y Saglam (2008).

Los MST fueron introducidos por Otakar Borůvka en 1926 (Boruvka, 1926) (ilustración 272) investigación que ha sido objeto de un análisis posterior retrospectivo en Nešetřil *et al.* (2001). Su introductor los aplica en el diseño de redes de transporte de electricidad.

Ilustración 272. Artículo original de O. Borůvka: *Príspevek k řešení otázky ekonomické stavby elektrovedných sítí* (Contribution to the solution of a problem of economical construction of electrical networks)



Fuente: Borůvka (1926).

Munisamy (2010) presenta un modelo de planificación portuario y análisis de la capacidad de una terminal de madera en una base experimental real en el puerto de Klang (Malasia). El modelo que desarrollan estos autores es un modelo de redes de cola (*queuing network model*) que mide la eficiencia de la terminal en términos del grado de utilización de su equipo de manipulación (incluyendo grúas de descarga, *forklifts*, elementos de transporte horizontal, etc...).

Por su interés didáctico, el modelo y sus resultados son discutidos en el Anejo nº1 de esta tesis (apartado 7 del anejo), epígrafe al que se puede acudir para evitar duplicidades entre este capítulo y aquel apéndice.

Park *et al.* (2014) presentan una nueva fórmula de evaluación de la capacidad de puertos de carga general refiriéndose específicamente estos autores a la capacidad de sus muelles de descarga. Para ello describen primero las fórmulas tradicionales de cálculo (se refiere a las introducidas por ejemplo por UNCTAD, 1973 y 1986; Hockey, 1979 y Hockey y Whiteneck, 1986) para, en un segundo paso, proponer una nueva formulación empírica cuyos resultados compararán con un caso real.

En la nueva propuesta analítica se apoyan en modelización y se basan en estudios anteriores sobre los parámetros que inciden en la productividad de los muelles como aquellos desarrollados en UNCTAD (1976), en el informe para el Banco Mundial elaborado por Chung (1993) o los estudiados por estos mismos investigadores recogidos en Park *et al.* (2013). Según estos autores las formulaciones tradicionales presentan ciertas limitaciones que les hacen alejarse del “mundo real” no considerando, convenientemente, el efecto de ocupación de atraque, el calendario laboral y los horarios de trabajo en base diaria, elementos que junto a otro número de variables, revisitan en su nueva formulación.

Wu *et al.* (2015) centran su investigación en las operaciones en terminales de carga general y, concretamente, en el diseño de las explanadas para almacenamiento. Definen el sistema que conforman este tipo de terminales como un “*sistema dinámico de eventos discretos y con una baja eficiencia*” que requiere de una mejora en las productividades y para lo que se fija, fundamentalmente, en una serie de terminales en China y las compara con las de otros países. Como principal elemento diferenciador de estas terminales frente a otras destacan la gran variedad de mercancías con distintas formas de presentación y sistemas de manipulación que son necesarios (ilustración 273). Diseñan un modelo basado en bloques y su función objetivo se basa en la minimización del tiempo de manipulación de la mercancía, tomando como base experimental con la que calibrar su modelo una terminal real en ese país. En su modelo se toma como punto de inicio la configuración del puerto y el equipamiento disponible y, en realidad, lo que se verifica son dos estrategias distintas de almacenamiento, concluyendo que la selección de una adecuada estrategia con la ayuda de simulación permite al gestor de la terminal incrementar la eficiencia, reduciendo los tiempos de operación y los costes asociados.

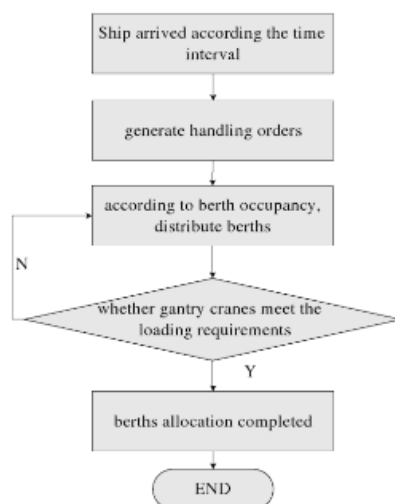
Ilustración 273. Variabilidad de cargas (tipología y formas de manipulación) en una terminal de mercancía general.



Fuente: Wu *et al.* (2015).

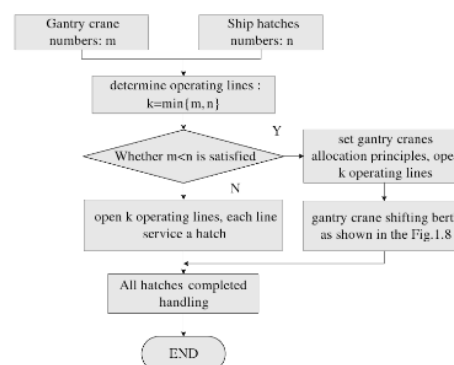
Estos investigadores realizan una división jerárquica de su modelo en diferentes etapas, módulos o procesos de los que presentan sus oportunos flujogramas. La secuencia empezaría con la asignación de atraque al buque (ilustración 274); seguiría con la asignación de grúa a cada una de las bodegas del buque atracado (ilustración 275); continuaría con la carga o descarga de dicha bodega (ilustración 276); con el cambio de ubicación o desplazamiento de la grúa a otra bodega al terminar el trabajo en la que viene operando (ilustración 277); y, finalmente, con la salida del buque y liberalización de espacio en el muelle.

Ilustración 274. Modulo de llegada de buques y asignación de atraque en el modelo de una terminal de mercancía general.



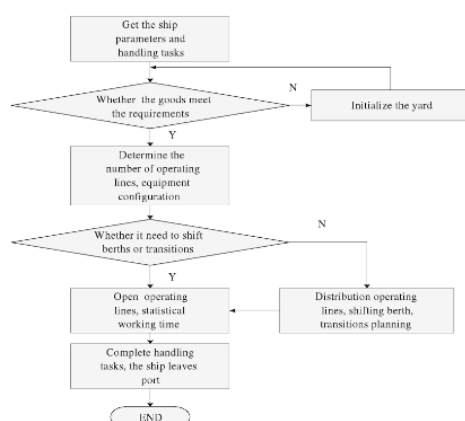
Fuente: Wu *et al.* (2015).

Ilustración 275. Proceso de asignación de grúas a bodegas de buque en el modelo de una terminal de mercancía general.



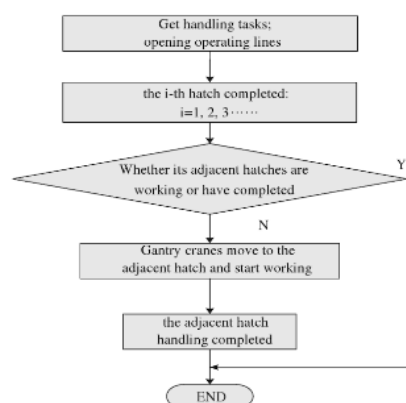
Fuente: Wu *et al.* (2015).

Ilustración 276. Proceso de carga y descarga de buques en el modelo de una terminal de mercancía general.



Fuente: Wu *et al.* (2015).

Ilustración 277. Proceso de movimiento de grúas en el modelo de una terminal de mercancía general.

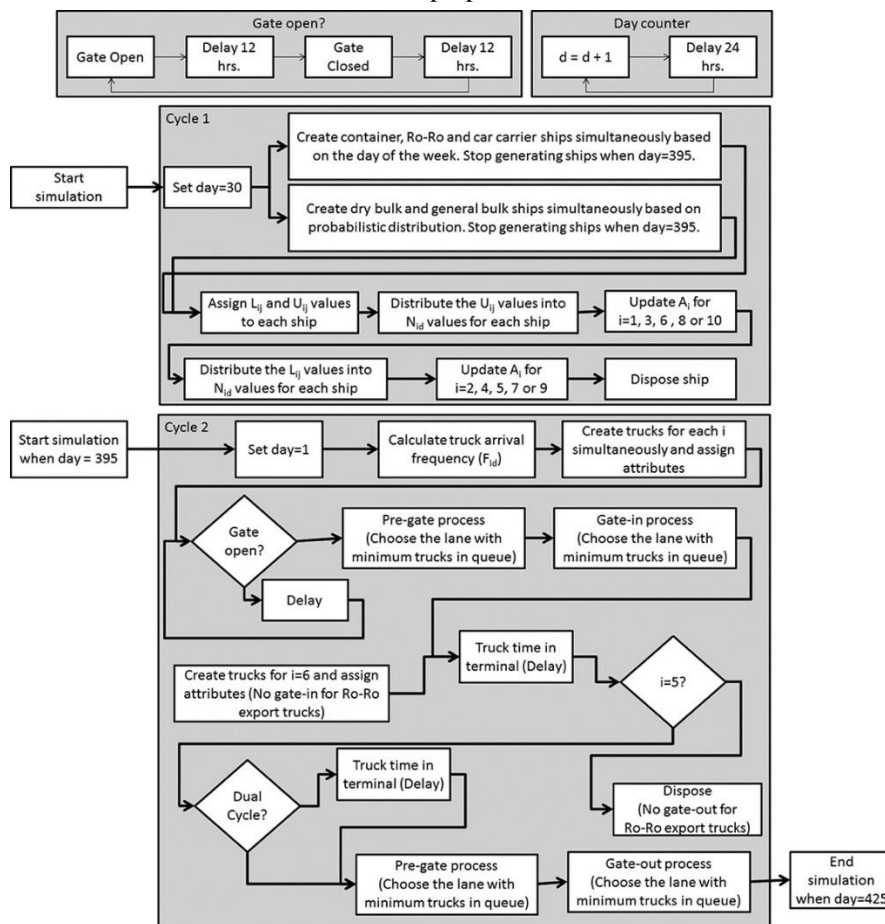


Fuente: Wu *et al.* (2015).

Por último dentro de este repaso bibliográfico e histórico, Kaceli (2016) realiza un modelo para simular las operaciones a la entrada de una terminal multipropósito. En su modelo considera que la explanada de dicha terminal puede dividirse en diferentes áreas en las que operan cada uno de

los tráficos que mueve la terminal (contenedores, carga seca, granel sólido, carga general y Ro-Ro). De igual modo, identifica como simplificación que las operaciones para cada tipo de tráfico se realizan en muelles diferenciados. Sin embargo, considera que los medios terrestres que operan en la terminal pueden usarse indistintamente para uno u otro tráfico con lo que las operaciones a la entrada de la terminal son tratados como una unidad. El objetivo de su investigación es, a la vista de este esquema de operación simplificado pero válido en muchos casos, dimensionar mediante simulación el tráfico a la entrada de la terminal y con ello las necesidades de infraestructura en este punto de acceso. Estos autores sintetizan la lógica de su modelo en el flujograma secuencial que se muestra a continuación (ilustración 278).

Ilustración 278. Flujograma secuencial lógico para simulación de la entrada de mercancía en una terminal multipropósito



Fuente: modelo de Kaceli (2016).

4.6 Conclusiones y futuras líneas de investigación.

Mientras que muchos son los estudios que se han publicado incluyendo modelos de simulación y optimización en el caso de terminales de contenedores, mucho más escasos son estos trabajos en otro tipo de infraestructuras portuarias.

Siendo así, las terminales de graneles sólidos y las de graneles líquidos, cuentan con un número apreciable de trabajos. En el primer caso, fundamentalmente centrados en los casos de terminales de carbón y mineral de hierro y, en el segundo, en los tráficos de crudo y productos petrolíferos y GNL.

Sin embargo, los enfoques en estos casos son mucho más limitados en alcance que los que se han visto en el caso de contenedores.

En el marco de esta tesis se han localizado un total de 59 artículos que tratan mediante técnicas de simulación y optimización las terminales de **graneles sólidos** y se ha podido comprobar como el interés de la comunidad científica que resuelve problemas de investigación operativa en este campo de actividad es exponencialmente creciente en el tiempo. Efectivamente, un único artículo corresponde a la década de los 60, dos (2) a la década de los 70 y cinco (5) en la de los 90, mientras que el número casi se duplica en los primeros años 2000 (16 artículos) y cuadriplica en la primera mitad de la presente década (solo en los cinco años contabilizados ya se han localizado 26 artículos científicos).

Analizando los artículos por el tipo de terminal que investigan se puede concluir que la mayor atención se ha prestado a las terminales de carbón (22 artículos), seguidas de terminales de carbón y mineral de hierro (11 artículos), poliprodueto (7 artículos), mineral de hierro (6 artículos) y grano (2 artículo).

En cuanto a las técnicas de simulación, en todos los casos se ha utilizado técnicas de simulación en eventos discretos (DES) y, de manera masiva, la simulación se aborda en terminales mecanizadas mediante cintas.

Con todo ello se proponían tres líneas de actuación específica para el segmento de tráficos de granel sólido:

- Modelización de una mayor variedad de productos;
- Modelización utilizando otros paradigmas de simulación (ABS y SD); y
- Modelización de terminales dotadas de otro tipo de maquinaria (vehículos en vez de cintas).

En el campo de los graneles líquidos, los primeros estudios de modelización en publicarse tuvieron que ver con los tráficos **de crudo de petróleo y otros productos petrolíferos**, y en gran medida centrados en resolver los problemas de enrutamiento y programación de cargas IRP y RSP, procesos de transbordo o *lightering* de carga desde grandes buques petroleros a buques más pequeños para hacer una distribución más local y procesos de *blending* en refinerías tratado conjuntamente con los procesos de programación de cargas y descargas.

Desde el punto de vista de futuros campos de investigación no se ha detectado que se trate el problema PISCP, incorporando como un elemento más el precio del crudo en la organización logística de transporte de esta mercancía.

De igual modo, no existen modelos que abarquen específicamente la respuesta de las compañías ante fenómenos extraordinarios como pueden ser bloqueos de puerto o estrechos, interrupciones del suministro por parte de algún productor relevante o relajación o incremento de las cuotas de exportación como respuesta de los productores a la volatilidad del mercado.

En lo que se refiere al estudio de la **cadena de suministro del GNL** se veía en el epígrafe 4.3.2.4 que este tráfico ha sido introducido en el campo de OR sólo en fechas muy recientes (salvo una excepción los 27 estudios analizados han sido publicados a partir de los años 2000), presentando, por tanto, un potencial de desarrollo futuro muy elevado.

Como pasaría con el caso de terminales y tráfico de crudo y otros productos petrolíferos los estudios en el sector del GNL se han centrado monotemáticamente en la resolución de problemas IRP y RSP, y sólo en fechas más recientes incorporando el precio del GNL como elemento relevante del modelo en una ampliación de los problemas anteriores que se ha venido en denominar PISCP.

Como campos de posible expansión científica en el campo del GNL destacábamos:

- Implantación de otros paradigmas de programación, más allá de la técnicas DES con formulaciones tipo MIP o MILP.
- Introducción como factor adicional en los clásicos IRP las previsiones meteorológicas en horizontes de corto plazo.
- Ampliación de los modelos PISCP, incluyendo la influencia en la demanda del GNL la evolución de precios de productos sustitutivos, fundamentalmente el carbón.
- Combinación mediante simulación de las cadenas logísticas del GNL y del gas por tubería.
- Análisis de las políticas de respuesta de las compañías frente a ciertos eventos catastróficos o situaciones de emergencia.
- Evaluación de la respuesta del mercado ante nuevas oportunidades y retos del mercado tales como la ampliación del canal de Panamá, la apertura de nuevas rutas marítimas en latitudes septentrionales, el reajuste de mercado cuando se produzca una masiva expiración de contratos de largo plazo en vigor o la entrada de nuevos volúmenes esperados en el mercado (Estados Unidos, Australia, Irán,...).
- Incorporación de nuevos nichos de mercado como son los proyectos de pequeña escala (*LNG small scale*) o el suministro de GNL como bunker de buques comerciales.

En contraste con las anteriores, las **terminales Ro-Ro** han despertado, hasta la fecha, un escaso interés en la comunidad científica, algo que parece no obedecer a la necesidad de construir nuevas terminales y mejorar las existentes en el contexto de promoción del tráfico marítimo de corta distancia (SSS). Se ha visto como los trabajos analizados son escasos y con muy poca diversidad geográfica e involucración de diferentes grupos de investigación. La práctica totalidad de realizaciones revisadas corresponden al mismo contexto (rampas Ro-Ro en Turquía) y realizadas por el mismo grupo de investigación (Escuela Politécnica de Estambul, Turquía).

A nuestro entender, un futuro nicho de investigación en este campo es la modelización de líneas regulares servidas por buques Ro-Ro conectando determinados puntos mediante servicios regulares y en los que se comparen los costes y tiempos de servicio entre modos de transporte alternativos (ferrocarril o camión) y el marítimo.

De igual modo, se pueden investigar diferentes modos de operación, uno en el que los buques transportan la carga con su cabeza tractora (viajando el conductor en el buque) o únicamente se transportan en el buque los semirremolques contando con cabezas tractoras diferentes en los puertos de embarque y desembarque. De este modo, los conductores no viajan en el buque y se limitan a realizar la distribución regional de los semirremolques a la llegada del barco a puerto o la concentración de cargas en los puertos de carga.

Sin duda, en estos modelos resulta esencial la investigación previa del hinterland y el *foreland* para conocer con exactitud el tipo de mercancía susceptible de moverse por medio marítimo confeccionándose matrices de origen – destino de mercancías con la mayor precisión posible.

Algo parecido a lo que se analizaba al abordar las terminales Ro-Ro pasa con las **terminales de vehículos**, donde se encuentran muy pocos estudios y muchos de ellos en China y, sobre todo, más centrados en aspectos infraestructurales que propiamente operativos (por el fuerte incremento de las importaciones de vehículos en la década del 2000 a consecuencia de las tasas de crecimiento de este país y la falta de producción nacional propia).

Las necesidades de grandes explanadas para el depósito de vehículos y el cambio en la cadena de suministro de este bien (fabricaciones bajo pedido en el que el puerto se configura como el verdadero almacén logístico de los fabricantes antes de la entrega y en el que se minimizan la estancia y movimientos internos de vehículos dentro de la terminal) hacen ver que este tipo de estudios presentan un potencial de futura aplicación, quizá para la adopción de sistemas autónomos (en vez de centralizados) en los que los vehículos toman sus propias decisiones en función de sus propios objetivos.

En este tipo de terminales todos los estudios se centran en el diseño y evaluación del rendimiento de su elemento crítico (las explanadas) sin ocuparse de otro elemento clave como es la llegada de vehículos o salida de los mismos del puerto por vía terrestre. La modelización de los accesos y terminales ferroviarias asociadas a este tipo de infraestructuras (al modo que se ha hecho en otros

contextos como el tráfico de contenedores) puede ser otro potencial campo de trabajo para futuros investigadores.

Resulta relevante el caso de las **terminales de ferries y pasajeros (cruceros)**. A pesar de la relevancia de este tipo de terminales, en un caso determinado por la importancia de estas infraestructuras en los sistemas de transporte de las ciudades donde se sitúan y en el segundo por la importancia estratégica, volumen y complejidad de movimientos que requieren las operaciones de embarque y desembarque de cruceristas; no se han encontrado prácticamente estudios que aborden esta temática en el contexto portuario. Prácticamente todos los ejemplos que se han localizado se refieren a resolver el problema de evacuación de embarcaciones en el caso de situaciones de emergencia.

Parece por tanto razonable proponer dos líneas de investigación diferenciadas en el contexto de este tipo de terminales.

Por un lado, expandir los estudios de evacuación de buques a condiciones de operación normal (no de emergencia) y por otro lado hacerlas expansivas no solo a los procedimientos de desembarque sino al propio embarque.

Por otro lado, y dado que en determinadas terminales de cruceros el desembarque se produce de manera masiva y los pasajeros acuden a tomar otro modo transporte (taxis o autobuses) para dirigirse a los sitios de visita (produciéndose verdaderas situaciones de congestión de las vías de comunicación terrestre y aparcamientos), se plantea como futura línea de trabajo el modelizar conjuntamente el proceso de desembarque con el de toma de otro modo de terrestre es decir, estudio específico de la interconexión de ambos modos.

Cerrando este capítulo se indicará que los trabajos que se han realizado en el campo de **terminales polivalentes y/o de carga general no contenedorizada** son realmente escasos. Quizá la diversidad de tráfico y dificultad de estandarizar las operaciones dificulta la explotación de un modelo de tipo microscópico en este tipo de infraestructura pero, sin duda, queda campo de investigación suficiente para introducir un tercer nivel de incertidumbre adicional a la naturaleza estocástica de la llegada de buques y distribución de tiempo de servicios que no es otro que la propia incertidumbre del lado de la demanda (tanto en volumen total como en descomposición o estructura de tráfico).

Bibliografía.

1. Acerbi, C.; Nordio, C. y Sirtori, C. (2001). *Expected Shortfall as a Tool for Financial Risk Management*. Working paper (Recurso no publicado). Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://www.pacca.info/public/files/docs/public/finance/Active%20Risk%20Management/ncs.pdf>
2. Acerbi, C. y Tasche, D. (2001). *Expected shortfall: a natural coherent alternative to value at risk*. Working paper de 9 de Mayo de 2011 (posteriormente publicados en Economic Notes, vol. 31 n° 2, pp: 1-10). Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://www.bis.org/bcbs/ca/acertasc.pdf>
3. Acerbi, C. y Tasche, D. (2002). *On the Coherence of Expected Shortfall*. Journal of Banking & Finance. vol. 26, n°7, julio 2002, pp: 1487–1503. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378426602002832>
4. Agra, M. (1999). *Decomposition of a combined inventory and time constrained ship routing problem*. Transportation Science, vol 33(1): 3–16. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.33.1.3>
5. Agra, A.; Christiansen, M y Delgado A (2012) *Mixed integer formulations for a short sea fuel oil distribution problem*. Transportation Science vol 47(1):108–124. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/trsc.1120.0416>
6. Agra, A.; Andersson, H.; Christiansen, M. y Wolsey, L. (2013). *A maritime inventory routing problem: Discrete time formulations and valid inequalities*. Networks, vol. 62, n° 4, december 2013. (© Wiley Periodicals, Inc.) Pages 297–314. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/net.21518/abstract>
7. Agra, A.; Christiansen, M.; Delgado, A.; y Simonetti, L. (2014). *Hybrid heuristics for a short sea inventory routing problem*. European Journal of Operational Research, vol 263(3): 924-935. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.042>

8. Agra, A., Christiansen, M. y Delgado, A. (2016). *Discrete time and continuous time formulations for a short sea inventory routing problem*. Optimization and Engineering, volumen 18(1): 269–297. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1007/s11081-016-9319-0](https://doi.org/10.1007/s11081-016-9319-0)
9. Ainouche, A., Djemmaa, A. y Smati, A (2002). *Reliability of LNG and natural gas transmission chain*. 17th World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, Brazil, September 2002.
10. Ainouche, A. y Smati, A (2002). *Optimization of LNG Chain by Stochastic Dynamic Programming*. 17th World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, Brazil, September 2002. Documento WPC-32331
11. Ainouche, A. (2003). *Optimization of LNG Chain by Stochastic Model*. 1^{ères} Journées nationales sure le traitement, le stockage, le transport et la distribution des hydrocarbures. Argel (Argelia) (20 Octubre 2003) Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://dalkoom.free.fr/and-inh/activites/comtra/C04.PDF>
12. Ainouche, A. (2004). *Modelling and Optimization of an LNG Chain by Graphs Theory*. Recurso no publicado pero disponible en [fecha de último acceso el 17-11-2016] <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4215/innhold/LNG%20Conferences/2004/Data/Posters-PDF/7-PO-36-Ainouche-2.pdf>
13. Aksoy, S: (2011). *Simulation modelling for Ro-Ro terminals*. Master's thesis Istanbul Technical University, Estambul (Turquía).
14. Almaz, O.A. y Altioek, T. (2012). *Simulation modeling of the vessel traffic in Delaware River: Impact of deepening on port performance*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol 22(2012): 146-165. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.12.004>
15. Al-Khayyal, F. y Hwang, S. (2007). *Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk. Part I: Applications and model* Journal of Operational Research vol. 176(1): 106-130. Disponible en [fecha de ultima consulta el 26-10-2016] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.047>
16. Al-Yakoob, S.M. (1997). *Mixed-integer mathematical programming optimization models and algorithms for an oil tanker routing and scheduling problem*. Tesis Doctoral. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia (Estados Unidos). 197 páginas. . Disponible en [fecha de ultima consulta el 26-10-2016] <https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-255314202974780/unrestricted/etd.pdf>

-
17. Álvarez J.F.; Longva, T. y Engebretsen E.S. (2010). *A methodology to assess vessel berthing and speed optimization policies*. Maritime Economics & Logistics Volumen 12(4): 327-346. doi:10.1057/mel.2010.11. Disponible en [fecha de última consulta el 26-10-2016] https://www.researchgate.net/publication/227470407_A_methodology_to_assess_vessel_berthing_and_speed_optimization_policies
 18. Andersson, H.; Hoff, A.; Christiansen, M.; Hasle, G. y Lokketangen, A. (2008). *Industrial Aspects and Literature Survey: Combined Inventory Management and Routing*. SINTEF report A7056, ISBN 978-82-14-04399-0.
 19. Andersson, H.; Christiansen, M. y Fagerholt, A. (2010). *Transportation Planning and Inventory Management in the LNG Supply Chain*. Capítulo del libro Energy, Natural Resources and Environmental Economics. Parte de las series Energy Systems, pp: 427-439. DOI: 10.1007/978-3-642-12067-1_24
 20. Andrews, S.; Murphy, F.H.; Wang, X.P. y Welch, S. (1996). *Modeling Crude Oil Lightering in Delaware Bay*. Interfaces 26(6):68-78. DOI: 10.1287/inte.26.6.68 Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://www.courses.vcu.edu/MATH-jrm/OPER641/Papers/DESCrudeOilDelewareBay.pdf>
 21. Angeloudis, P. y Bell M.G.H. (2011). *A review of container terminal simulation models* Maritime Policy and Management, vol: 38, pp: 523-540, ISSN: 0308-8839. Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/233371722_A_review_of_container_terminal_simulation_models
 22. Artzner, P.; Delbaen, F.; Eber, J.-M. y Heath, D. (1997). *Thinking coherently*. RISK, vol. 10, nº 11, pp: 68-71.
 23. Artzner, P.; Delbaen, F.; Eber, J.-M. y Heath, D. (1998). *Coherent measures of risk*. Working Paper (no publicado). 24 páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <https://people.math.ethz.ch/~delbaen/ftp/preprints/CoherentMF.pdf>
 24. ASCE (1984). *Erratum: Optimum Number and Capacity of Seaport Berths* by Michihiko Noritake and Sakuo Kimura (August, 1983). Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 110(3): 359-360 Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1984\)110:3\(359.2\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:3(359.2))

-
25. Ashar, A. y Ayzanoa, G. (1995). *Stock and Flow methodology for calculating capacity of cargo transfer terminals*. Conference on Transportation Management, State University of New York, Maritime College (New York, Estados Unidos), pp: 1-11. Disponible en [fecha de última consulta el 01.06.2017] <http://www.asafashar.com/Stock%20and%20Flow%20Methodology%20for%20Calculating%20Capacity%20of%20Cargo%20Transfer%20Terminal.pdf>
 26. Asperen, E. van; Dekker, R.; Polman, M.T.H. y Swaan Arons, H. de (2003). *Modeling ship arrivals in ports*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. 7–10 Diciembre 2003, New Orleans, LA. Editado por S. Chick, P.J. Sánchez, D. Ferrin y D.J. Morrice. Páginas. 1737–1744. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/4053670_Modeling_Ship_Arrivals_in_Ports
 27. Baker, T. E. (1981). *Interactive Vessel Scheduling at Exxon*. Presentado en CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting, Toronto (Canada).
 28. Baillard, D.; Berger, C.; Haurie, A. y Loulou, R.(1987). *Modelling the Long Range Evolution of the Oil Refining Industry in Canada: The MARKAL Model Approach*. Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (GERAD) Discussion paper – G-87-04. 87 Páginas.
 29. Baillard, D.; Berger, C.; Haurie, A. y Loulou, R.(1985). *MARKAL-QUÉBEC: A Report on the Model and Data Base Improvements*. Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (GERAD) Discussion paper – G-85-23. 51 Páginas.
 30. Balakhontceva, M.; Karbovskii, V.; Rybokonenko, D. y Boukhanovsky, A. (2015). *Multi-agent Simulation of Passenger Evacuation Considering Ship Motions*. Procedia Computer Science, vol 66, 2015, pp: 140-149. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.11.017>
 31. Baunach, G.R.; Wibberley, E.S. y Wood B.R. (1985). *Simulation of a coal transshipment terminal: Batam Island, Indonesia*. Mathematics and Computers in Simulation 27 (2-3)(1985): 115–120. Disponible bajo petición en [fecha de última consulta el 26-10-2016] https://www.researchgate.net/publication/223632513_Simulation_of_a_coal_transshipment_terminal_Batam_Island_Indonesia
 32. Bausch, D. O., Brown, G. G., y Ronen, D. (1998). *Scheduling short-term marine transport of bulk products*. Maritime Policy & Management vol 25(1):335-348. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] DOI: [10.1080/03088839800000057](https://doi.org/10.1080/03088839800000057)

-
33. Bausch, D. O., Brown, G. G., y Ronen, D. (1991). *Elastic Set partitioning – A Powerful Tool for Scheduling Transportation of Oil and Gas*. Proceedings of the Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry, 13-14 de Junio de 1991, Montreal (Canada). Editores M. Breton y G. Zaccour. Editions Technip, Paris, (Francia), pp :151-162. ISBN : 9782710806103. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <http://www.editionstechnip.com/fr/catalogue-detail/60/advances-in-operations-research-in-the-oil-and-gas-industry.html>
34. Beattie, C.J.; Brown, A.P. y Norris, M.E. (1970). *Planning deep-water ports*. Management Decision, (1970) Vol. 4 Issue: 4, pp.55 – 61.
35. Beattie, C.J.; Brown, A.P. y Norris, M.E. (1971). *Planning deep-water ports*. Journal of Operational Research Society 22 (1). Volumen: 63–75 (1971). DOI: 10.1057/jors.1971.9. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/32033365_Planning_Deep-Water_Ports y <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/eb000951>
36. Bellmore, M.; Bennington, G. y Lubore, S. (1968). *A Maximum Utility Solution to a Vehicle Constrained Tanker Scheduling Problem*. The Mitre Corporation. Report MRT - 319 (24 páginas). También presentado en Naval Research Logistics Quarterly, 15 (3): 403-411. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=AD0684708>
37. Bellmore, M.; Bennington, G., y Lubore, S. (1971). *A Multi-Vehicle Tanker Scheduling Problem*. Transportation Science, vol 5 (1): 36-47. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.5.1.36>
38. Benoist, T.; Gardiz, F.; Megelx, R.; Pajean, C.; Belgacem, M.B.; Leblanc, D. ; Legrandy, F. y Pietrasz, S. (2016):. *Designing and optimizing an LNG supply chain using LocalSolver*. Remitido para revisión a sciencesconf.org:verolog2016:98628. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <https://verolog2016.sciencesconf.org/98628/document>
39. Berger, C. (1985). *La modélisation des raffineries dans MARKAL-Québec*. Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (GERAD) Discussion paper – G-85-26. 139 Páginas.
40. Beškovnik, B. y Twrdy, E. (2011). *Managing maritime automobile terminals: an approach toward decision-support model for higher productivity*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. Vol 3(4): 233–241. Disponible en [fecha de último acceso 27.05.2017] <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0067>

41. Bhasi. M. y Acharya, D. (1997). *Optimization of barge mix for ship lightering operations*. Bulk Solids Handling 17(2). Páginas 219-226 (Enero 1997). Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/261179542_Optimization_of_barge_mix_for_ship_lightering_operations
42. Bhasi (2004). *Ship Unloading-A Simulation Based Model for Scheduling of Barges for Ship Lightering*. Bulk Solids Handling 24(4). (Octubre 2004). Páginas 248-251. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/261179543_Ship_Unloading-A_Simulation_Based_Model_for_Scheduling_of_Barges_for_Ship_Lightering
43. Birge, J.R. (1982). *The value of stochastic solution in stochastic linear programs with fixed resource*. Mathematical Programming 24 (1982). Páginas 314-325. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/47912/10107_2005_Article_BF01585113.pdf?sequence=1
44. Bittantea, A.; Jokinen, R.; Petterssonb, F. y Saxéna H, (2015). *Optimization of LNG Chain*. Computer Aided Chemical Engineering Volume 37, 2015, Páginas 779–784 (12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444635785501250>
45. Bjørstad, H. y Haugland, D. (1991). *A stochastic model for gasoline blending*. Proceedings of the Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry, 13-14 de Junio de 1991, Montreal (Canada). Editores: M. Breton y G. Zaccour. EdicionesTechnip, Paris, (Francia), pp :21-32. ISBN : 9782710806103. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2016] <http://www.editionstechnip.com/fr/catalogue-detail/60/advances-in-operations-research-in-the-oil-and-gas-industry.html>
46. Borůvka, O. (1926). *Příspěvek k řešení otázky ekonomické stavby elektrovodních sítí (Contribution to the solution of a problem of economical construction of electrical networks)*“. Elektronický Obzor (en Checoslovaco) vol 15(1): 153–154.
47. Boschert, S. y Hellmuth, T. (2010). *Simulation in bulk material handling*. Proceedings of the BulkSolids Europe Conference, Scotland. September 9-10, 2010.
48. Böse, F. y Lampe, W. (2005) *Adoption of RFID in Logistics*. Proceedings of the 5th International Business Information Management Association Conference (IBIMA'2005):

-
- The internet & Information in Modern Organizations, 13-15 de diciembre de 2005, Cairo (Egipto).
49. Böse, F.; Piotrowski, J. y Windt, K (2005). *Selbststeuerung in der Automobil-Logistik*. Industriemanagement, vol. 20(4): 37-40. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] http://www.sfb637.uni-bremen.de/fileadmin/SFB_Files/PDF_Download/SFB637-A1-Ia-05-01.pdf
50. Böse, F. y Windt, K., 2007. *Autonomously Controlled Storage Allocation on an Automobile Terminal*. Understanding autonomous cooperation and control in logistics, Berlin: Springer- Verlag, pp.351-363 (M. Hülsmann and K. Windt, eds.). Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] <http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-A1-07-032-IA.pdf>
51. Boxall, P.; Gwynne, S-; Filippidis, L.; Galea, E.R. y Cooney, D. (2005). *Advanced Evacuation Simulation Software and its use in Warships*. Proceedings of the Human Factors in Ship Design, Safety and Operation, Londres (Reino Unido), Publicado por The Royal Institute of Naval Architects, 23-24 Feb 2005, pp: 49-56. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
52. Boulougouris, E.K. y Papanikolaou, A. (2002). *Modelling and Simulation of the evacuation process of passenger ships*. Proceedings of the 10th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2002). Creta (Grecia), pp:1-5 (Editor: S.A. Mavrakos & K.J. Spyrou). Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] http://old.naval.ntua.gr/sdl/Publications/Proceedings/IMAM2002_Proceed57.pdf
53. BP Statistical Review (2016). *BP Statistical Review of World Energy June 2016*. BP Statistical Review of World Energy. BP p.l.c. (1 St James's Square, London SW1Y 4PD, Reino Unido). Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
54. Bremer, W.M. y Perakis, A.N.(1992). *An operational tanker scheduling optimization system: model implementation, results and possible extensions*. Maritime Policy & Management, vol 19 (3), 189–199. Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] DOI: 10.1080/751248660
55. Breton, M, y El-Hachem S. (1991). *Application of stochastic programming to medium and long term planning in the refining industry*. Proceedings of the Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry, 13-14 de Junio de 1991, Montreal (Canada). Editores: M. Breton y G. Zaccour. EdicionesTechnip, Paris, (Francia), pp:1-

-
20. ISBN : 9782710806103. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2016] <http://www.editionstechnip.com/fr/catalogue-detail/60/advances-in-operations-research-in-the-oil-and-gas-industry.html>
56. Briskin, L. E. (1966). *Selecting Delivery Dates in the Tanker Scheduling Problem*. Management Science, 12 (6): 224-233. Disponible en [fecha último acceso el 14.11.2016] <http://www.jstor.org/stable/2628121>
57. Brooks, M. (1990). *Ocean Carrier Selection Criteria in a New Environment*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, vol 26(4):339-355. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/267038620_Ocean_Carrier_Selection_Criteria_in_a_New_Environment
58. Brooks, M. (1995). *Understanding the ocean container market—a seven country study [1]*. Maritime Policy & Management vol. 22(1):39-49. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] DOI: 10.1080/03088839500000031
59. Brown, G. G.; Graves, G. W. y Ronen, D. (1987). *Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil*. Management Science, vol 33(3): 335-346. DOI: 10.1287/mnsc.33.3.335. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/227445852_Scheduling_Ocean_Transportation_of_Crude_Oil.
60. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012a). *IMO Information paper - response time data for large passenger ferries and cruise ships*. SAFEGUARD Passenger Evacuation Seminar. 30 de Noviembre 2012, Londres, (Reiuno Unido), pp. 92-96, ISBN 978-1-909024-08-3, 2012. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
61. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012b). *IMO INF paper summary - response time data for large passenger ferries and cruise ships*. S AFEGUARD Passenger Evacuation Seminar. 30 de Noviembre 2012, Londres, (Reiuno Unido),pp. 91, ISBN 978-1-909024-08-3. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
62. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012c). *Passenger response time datasets for large passenger ferries and cruise ships derived from sea trials and recommendations to IMO to update MSC circ 1238*. SAFEGUARD Passenger Evacuation Seminar. 30 de Noviembre 2012, Londres, (Reiuno Unido), pp. 25-40, ISBN 978-1-909024-08-3. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>

-
63. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012d). *Response time data for large passenger ferries and cruise ships*. Proceedings of the 5th International Symposium, Human Behaviour in Fire, Cambridge (Reino Unido), 19-21 September 2012, Interscience Communications Ltd. pp. 460-471. ISBN 978-0-9556548-8-6, 2012. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
 64. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S., y Filippidis, L. (2013). *Passenger Response Time Data-Sets for Large Passenger Ferries and Cruise Ships Derived from Sea Trials*. The Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, International Journal of Maritime Engineering, ISSN 1470-8751, Vol 155, Part A1, pp: 33-47.
 65. Brumley, A. y Koss, L. (2000). *The influence of human factor on the motor ability of passengers during evacuation of ferriers and cruise ships*. Conference on Human Factors in ship Design and Operations, Londres (Reino Unido). Editado por The Royal Institute of Naval Architects.
 66. Bugaric, U. y Petrovic, D. (2002). *Modelling and simulation of specialized river terminals for bulk cargo unloading with modeling of the elementary sub-systems*. Systems Analysis Modelling Simulation 42(10):1455-1482 · (Enero 2002). Páginas 1455–1482. DOI: 10.1080/713745639. Disponible bajo petición [fecha último acceso el 14.11.2016] en https://www.researchgate.net/publication/233025626_Modeling_and_Simulation_of_Specialized_River_Terminals_for_Bulk_Cargo_Unloading_with_Modeling_of_the_Elementary_Sub-Systems
 67. Bugaric, U. y Petrovic, D. (2007). *Increasing the capacity of terminal for bulk cargo unloading*. Simulation Modelling Practice and Theory 15(10) (Noviembre 2007). Páginas 1366–1381. Disponible bajo petición [fecha último acceso el 14.11.2016] en https://www.researchgate.net/publication/220674524_Increasing_the_capacity_of_terminal_for_bulk_cargo_unloading
 68. Bugaric, U.; Petrovic, D.; Petrovic, Z.; Pajcin, M. y Markovic-Petrovic, G. (2011). *Determining the Capacity of Unloading Bulk Cargo Terminal Using Queuing Theory*. Journal of Mechanical Engineering 57 (2011) 5, 405-416 (2011). Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] http://www.svjme.eu/data/upload/2011/05/05_2009_084_Bugaric_05.pdf
 69. Burge J.E. (1998). *Knowledge Elicitation Tool Classification*. Master Thesis. Computer Science Department. Artificial Intelligence Research Group. Worcester Polytechnic Institute, Worcester (Massachusetts, Estados Unidos) http://web.cs.wpi.edu/~jburge/thesis/kematrix.html#_Toc417957397

-
70. Buxton, I.L. y Akgul, B.U. (1989). *The comparison of general cargo ship economic performance by simulation*. Maritime Policy & Management , vol.16(1): 27-44. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/030888389000000021>
71. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014a). *Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions*. Flexible Services and Manufacturing Journal 235(2) · June 2014. Disponible en [fecha de última consulta el 28/11/2015] https://www.researchgate.net/publication/257563135_Storage_yard_operations_in_container_terminals_Literature_overview_trends_and_research_directions
72. Bugaric, U.; Petrovic, D.B.; Jeli, Z.V. y Petrovic, D.V. (2012). *Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading*. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International 88(12) (December 2012) Pp: **1508-1521**. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/258188085_Optimal_utilization_of_the_terminal_for_bulk_cargo_unloading
73. Caldeira-Saraiva, F.; Gyngell, F.J. Wheeler, R.; Galea, E.R.; Carran, A.; Skjong, R.; Vanem, E.; Johansson, K.; Rutherford, B. y Simoes, A.J. (2004). *Simulation of ship evacuation and passenger circulation*. Proceedings of the 2nd International Maritime Safety Conference on Design for Safety, Sakai (Japón), Publicado por Ship and Ocean Foundation, 27-30 Oct 2004, pp: 197-205. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
74. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014a). *Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions*. Flexible Services and Manufacturing Journal 235(2) · June 2014. Disponible en [fecha de última consulta el 28/11/2015] https://www.researchgate.net/publication/257563135_Storage_yard_operations_in_container_terminals_Literature_overview_trends_and_research_directions
75. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014b). *Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme*. European Journal of Operational Research 236(1):1–13 · July 2014. Disponible en [fecha de última consulta el 28/11/2015] https://www.researchgate.net/publication/260556440_Transport_operations_in_container_terminals_Literature_overview_trends_research_directions_and_classification_scheme
76. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2015). *Seaside Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions*. Flexible Services

-
- and Manufacturing Journal. Volumen 27, números 2-3, Páginas 224-262. Disponible en [fecha de última consulta el 28/11/2015] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10696-013-9178->
77. Cassettari, L.; Mosca, R.; Revetria, R. y Rolando, F. (2011). Sizing of a 3,000,000t bulk cargo port through discrete and stochastic simulation integrated with response surface methodology techniques. Proceedings of the 11th WSEAS International conference on Signal processing, Computational Geometry and Artificial Vision, Florencia, Italia, 2011, Pp: 211–216. Disponible en [fecha de acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/259308707_Sizing_of_a_3000000t_Bulk_Cargo_Port_through_Discrete_and_Stochastic_Simulation_Integrated_with_Response_Surface_Methodology_Techniques
78. Cen, Z. (2011). *LNG Portfolio Optimizacion*. Tesis Doctoral. (Director: J.F. Bonnans) l'École Polytechnique ParistecgCentre de Mathématiques Appliquées - UMR 7641. INRIA Saclay - Île de France. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] http://www.cmapx.polytechnique.fr/~cen/Thesis_chap1.pdf
79. Chertkoff, J., y Kushigian, R. (1999). *Don't Panic: The Psychology of Emergency Egress and Ingress*. Editorial Praeger, Londres (Reino Unido). 160 Páginas ISBN-10: 0275962687
80. Cigolini, R. y Rossi, T (2010). *Sizing off-shore transshipment systems in dry-bulk transportation*. Production Planning and Control 21(5). (Julio 2010) Páginas 508-522. DOI: 10.1080/09537280903514587 Disponible bajo petición en [fecha de última consulta el 26-10-2016] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09537287.2011.598266>
81. Cigolini, R.; Pero, M.; Rossi, T (2011): *Sizing off-shore transshipment systems: A case study in maritime dry-bulk transportation*. Production Planning and Control 24(1). (Enero 2011). Páginas 1-13. DOI: 10.1080/09537287.2011.598266. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09537287.2011.598266>
82. Cigolini, R.; Pero, M.; Rossi, T. y Sianes, A. (2013): *Using simulation to optimize transshipment systems: applications in field*. Maritime Economics & Logistics 15(3). Páginas: 332–348. Disponible bajo petición en [fecha de última consulta el 26-10-2016] https://www.researchgate.net/publication/263326126_Using_simulation_to_optimize_transshipment_systems_Applications_in_field
83. Chen, S.; Frouws, Ky Van De Voorde, E. (2011). *Simulation-based optimization of ship design for dry bulk vessels*. Maritime Economics & Logistics 13(2): 190–212. Disponible

- en [fecha de acceso el 05-12-2016]
https://www.researchgate.net/publication/227470419_Simulation-based_optimization_of_ship_design_for_dry_bulk_vessels
84. Cho, J.; Lim, G.; Biobaku, T.; Bora, S. y Parsaei H. (2014). *Liquefied Natural Gas Ship Route Planning Model Considering Market Trend Change*. Working Paper (recurso no publicado o pendiente de publicacion). Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/267623438_Liquefied_Natural_Gas_Ship_Route_Planning_Model_Considering_Market_Trend_Change
 85. Chen, Y. y Chen, C. (2004). *Design principle for the handling process and plan layout of commercial automobile Ro/Ro terminal.*, Port & Motorway Engineering, vol. 3(1): 21–23. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017]
http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SYGC200403007.htm
 86. Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2004a). *Ship routing and scheduling: Status and perspectives*. Transportation Science, vol. 38(1): 1–18. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] [doi>10.1287/trsc.1030.0036](https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0036)
 87. Christiansen, M.; Fagerholt, K- y Ronen, D. (2004b). *Ship routing and scheduling – status and perspectives*. Transportation Science, vol. 38, nº 1, pp: 1-18. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/220412954_Ship_Routing_and_Scheduling_Status_and_Perspectives
 88. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). *Maritime transportation*. In “*Handbooks in operations research & management science: vol, 14. Transportation*” Páginas 189–284 (Editado por C. Barnhart & G. Laporte). Amsterdam: Elsevier B.V. DOI: 10.1016/S0927-0507(06)14004-9 Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017]
https://www.researchgate.net/profile/Kjetil_Fagerholt/publications?sorting=newest&pubType=article&page=5
 89. Christiansen, M., & Fagerholt, K. (2008). *Maritime inventory routing problems*. In C. A. Floudas & P. M. Pardalos (Eds.), *Encyclopedia of optimization* (2nd Edition) (pp. 1947–1955). Publisher: Springer; 2nd edition (September 4, 2008). 622 pages. ISBN-10: 0387747583. ISBN-13: 978-0387747583
 90. Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Hasle, G.; Minsaas, A. y Ronen, D. (2009). *Maritime Transport Optimization: An ocean of opportunities*. Operational Research Today (OS Today) Abril 2009, pp: 26-31. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017]

[https://www.researchgate.net/publication/237494127 AN OCEAN OF OPPORTUNITIES](https://www.researchgate.net/publication/237494127)

91. Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Flatberg, T.; Haugen, Ø.; Kloster, O. y Lund, E. (2011). *Maritime inventory routing with multiple products: a case study from the cement industry*. European Journal of Operational Research, vol 208(1):86–94. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.023>
92. Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Nygreen, B. y Ronen, D. (2013). *Ship routing and scheduling in the new millennium*. European Journal of Operational Research, vol 228(3): 467–483 Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.002>
93. Chung K.C (1993). *Port Performance Indicators*. Transportation, Water and Urban Development Department of World Bank, Transport No. PS-6. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] <http://documents.worldbank.org/curated/en/303501468337289364/pdf/816090BRI0Infr00Box379840B00PUBLIC0.pdf>
94. Cosma, E.P.; Pérez, F.; Morales, A. y Robles, T. (2013). e-Flow – Sistema integral inteligente de soporte a la evacuación. 52 Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima., Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid. Recurso en línea. 40 páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] [https://www.researchgate.net/publication/258200894 e-Flow - Sistema integral inteligente de soporte a la evacuacion](https://www.researchgate.net/publication/258200894)
95. Daganzo, C.F. (1990b). *Productivity of Multipurpose Seaport Terminals*. Transportation Science, vol 24(3): 205-216. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.24.3.205>
96. Dahal, K.P.; Burt, G.M.; McDonald; J.R. y Moyes, A. (2001). *A case study of scheduling storage tanks using a hybrid genetic algorithm*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Volumen 5, Páginas: 283–294 . Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017]. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [https://www.researchgate.net/publication/27312827 A Case Study of Scheduling Storage Tanks Using a Hybrid Genetic Algorithm](https://www.researchgate.net/publication/27312827)
97. Dahal, K.P.; Galloway, S.; Burty, G.M.; McDonald; J.R. y Hopkins, I. (2003). *A port system simulation facility with an optimization capability*. International Journal of Computational Intelligence and Applications, Vol. 3, No. 4, pp. 395-410, 2003. DOI: 10.1142/S1469026803001099. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017]

https://www.researchgate.net/publication/220606287_A_Port_System_Simulation_Facility_With_An_Optimization_Capability

98. Dahal, K.P.; Galloway, S.; Burty, G.M.; McDonald; J.R. y Hopkins, I. (2007). *Modelling, simulation and optimisation of port system management*. International Journal of Agile Systems and Management Volume 2(1). Páginas 92–108 (Enero 1997). Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/228624110_Modelling_simulation_and_optimisation_of_port_system_management
99. Dahl, K. (2007). *Optimization of the LNG-value chain*. Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2007.
100. Danskin, J.M. (1967). *The Theory of Max-Min and its Applications to Weapons Allocation Problems*. Econometrics and Operations Research Volume 5 (1967) (Ed. Springer Berlin Heidelberg). ISBN: 978-3-642-46094-4 (Print) 978-3-642-46092-0 (Online)
101. Dantzig, G.B. y Fulkerson, D.R. (1954). *Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule*. Naval Research Logistics Quarterly, vol 1(3): 217-222. DOI: 10.1002/nav.3800010309. Disponible en [fecha de último acceso el 16.11.2016] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/604400.pdf>
102. Dantzig, G.B. y Wolfe, F.(1960). *Decomposition Principle for Linear Programs*. Operations Research, vol 8(1): 101–111. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] doi:10.1287/opre.8.1.101.
103. Dash (1999). *XPRESS-MP Reference Manual*. Dash Associates Limited (Warwickshire, Reino Unido). 100 Páginas. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://www.cs.elte.hu/docs/XPRESS/UGUIDE11.PDF>
104. Dash (2000). *XPRESS-MP: Modeller Subroutine Library XMSL Reference Manual* Dash Associates Limited (Warwickshire, Reino Unido). (10 de Junio de 2000). 20 Páginas. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://www.cs.elte.hu/docs/XPRESS/XMSL12.PDF>
105. Dash (2002). *Xpress-Mosel Language: Reference Manual*. Dash Optimization Ltd. Englewood Cliffs (Nueva York, Estados Unidos). 232 Páginas. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] http://home.deib.polimi.it/malucell/didattica/appunti/mosel/mosel-language_reference.pdf

-
106. Daskin, M.S. y Walton, C.M. (1983). *An approximate analytic model of supertanker lightering operations*. Transportation Research Part B Methodological, vol 17(3): 201-219. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] [DOI: 10.1016/0191-2615\(83\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0191-2615(83)90015-2)
107. David, R. y Alla, H. (1994). *Petri nets for modeling of dynamical systems: a survey*. Automatica, 30, 175–202. Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 30-11-2016] https://www.researchgate.net/publication/223625435_Petri_nets_for_modeling_of_dynamic_systems_A_survey
108. Deere, S.; Galea, E.R.; Lawrence, P. y Gwynne, S. (2006) *The Impact of the passenger response time distribution on ship evacuation performance*, The Transactions of The Royal Institution of Naval Architects, Vol 148, Part A1 (Journal of Maritime Engineering), ISSN 1479-8751, pp 35-44, 2006. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
109. Deere, S.; Galea, E.R. y Lawrence, P. (2008). *Assessing Naval Ship Design for Human Factor: Issues Associated with Evacuation and Normal Operations*”, Proceedings of the 7th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries - COMPIT08, (Ed: V.Bertram y P. Rigo), 21-23 Abril 2008, Lieja (Bélgica), ISBN-10 2-9600785-0-0, pp 33-47, 2008. Full conference proceedings can be downloaded from ". Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://www.anast.ulg.ac.be/COMPIT08/>
110. de la Peña, I. y Canales M.I. (2012). Logística del tráfico de GNL y sus implicaciones en el desarrollo de infraestructuras y servicios portuarios: Pasado, Presente y Perspectivas de Futuro. Proceedings of the II Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering, pp 255-277. Valencia (España) (Mayo 2012). Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/258698309_LOGISTICA_DEL_TRAFICO_DE_GNL_Y_SUS_IMPLICACIONES_EN_EL_DESARROLLO_DE_INFRAESTRUCTURAS_Y_SERVICIOS_PORTUARIOS_PASADO_PRESENTY_PERSPECTIVAS_DE_FUTURO
111. Delphi (2016). *Delphi 2010*. Embarcadero Technologies, Inc. Disponible en [fecha de último acceso el 16.11.2016] <https://www.embarcadero.com/es/products/delphi>
112. Demirci, E. (2003). *Simulation Modelling and Analysis of a Port Investment*. SIMULATION Volumen 79 (2) (Febrero 2003). Páginas: **94-105**. doi: 10.1177/0037549703254523 Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/220164579_Simulation_Modelling_and_Analysis_of_a_Port_Investment

113. Dias, J.C.Q.; Calado, J.M.F y Mendonça, M.C. (2010). *The role of European «ro-ro» port terminals in the automotive supply chain management*. Journal of Transport Geography, vol 18(1): 116-124. Disponible en [fecha de último acceso 27.05.2017] <https://core.ac.uk/download/pdf/19126670.pdf>
114. Dong, Y. y Liu X. (Dong, Y. and Liu, X. (2009) *An Interactive Simulation System for Process System of Bulk Cargo Terminal*. Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China (ed. Amercian Society of Civil Engineers (ASCE): pp. 4388-4397. doi: 10.1061/40996(330)641. Disponible en <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40996%28330%29641>
115. Douligeris, C.; Iakovou, E.; Englehardt, J.D.; Li, H.; Ip, C.M. y Mooers, C.N.K. (1997). *Development of a national marine oil transportation system model*. Spill Science & Technology Bulletin, vol 4(2):113-121. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00022-4. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/222503893_Development_of_a_National_Marine_Oil_Transportation_System_Model
116. Dragovic, B.; Tzannatos, E. y Park, N.K. (2016). Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool. Flexim Service Manufacturing Journal. DOI 10.1007/s10696-016-9239-5. © Springer Science & Business Media (New York 2016). Disponible en [fecha de último acceso el 07.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/295789843_Simulation_modelling_in_ports_and_container_terminals_literature_overview_and_analysis_by_research_field_application_area_and_tool
117. Drewry (1999). *Market Outlook for car carriers*. Drewry Shipping Consultants Ltd. Drewru House, Meridian Gate-South Quay, 23 Marsh Wall, London E14 9FJ, Londres (Inglaterra)
118. Duinkerken, M.B.; Ottjes, J.A. y Lodewijks G. (2002). *The Application of Distributed Simulation in TOMAS: Redesigning a Complex Transportation Model*. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (WSC 2002). Editado por E. Yücesan, C-H. Chen, J.I. Snowdown y J.M. Charnes. Diciembre 2002. San Diego. ISBN 0-7803-7615-3 Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://www.tomasweb.com/publications/san0212.pdf>
119. El Sheikh, A.A.R.; Paul, R.J.; Harding, A.S. y Balmer, D.W. (1987). *A microcomputer-based simulation study of a port*. Journal of the Operational Research Society 38: 673–681. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://cuip.uchicago.edu/~cac/nlu/tie512win10/articles/A%20Microcomputer-Based%20Simulation%20Study%20of%20a%20Port.pdf>

-
120. Emanuelsen, K. y Thordvalsen, S. (2012). *Supply Chain Optimization in the LNG Business*. Master Thesis. Industrial Economics and Technology Management. NTNU Trondheim. Norwegian University of Science and Technology. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:626521/FULLTEXT01.pdf>
121. Engineer, F.G.; Furman, K.C.; Nemhauser, G.L.; Savelsbergh, M.W.P. y Song, J.-H. (2012). *A branch price-and-cut algorithm for single-product maritime inventory routing*. Operations Research, vol 60 (1): 106-122. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.1110.0997?journalCode=opre>
122. Enríquez, F. (1991). *Multipurpose port terminals: Recommendations for planning and management*. UNCTAD Monographs on Port Management. United Nations Conference on Trade and Development Secretariat, Naciones Unidas, Nueva York (Estados Unidos), 67 páginas. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] http://unctad.org/en/Docs/ship4949_en.pdf
123. Erichsen, S. (1981). *Simulation of receiving, storing and loading general cargo*. University of Michigan. Department of Naval Architecture and Marine Engineering. 133 Páginas.
124. Erichsen, J.C. y Røstad, L.D. (2012). *Investments in the LNG Value Chain: A Multistage Stochastic Optimization Model focusing on Floating Liquefaction Units*. Norwegian University of Science and Technology. Department of Industrial Economics and Technology Management. Master Thesis. 164 Páginas. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:626528/FULLTEXT01.pdf>
125. Epting, F.; Probert, J.S. y Pittman, S.D. (2007). *Alternative strategies for construct elicitation: Experimenting with experience*. International Journal of Personal Construct Psychology, volume 6(1): 79-98. DOI: 10.1080/08936039308404333
126. Etkin, S. (1999). *Estimating cleanup costs for oil spills*. Proceedings of the 1999 International Oil Spill Conference (IOSC'99), Seattle (Washington, USA), 8-11 de Marzo de 1999. Section M1B: Spill Funding, pp: 35-40. DOI: 10.7901/2169-3358-1999-1-35 Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] <http://ioscproceedings.org/doi/pdf/10.7901/2169-3358-1999-1-35>
127. Etkin, S. (2000). *Worldwide analysis of marine oil spill cleanup cost factors*. Proceedings 23rd Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar (AMOP'2000), Vancouver

- (Canadá). 14-16 de junio de 2000. pp: 161–174. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] http://www.environmental-research.com/publications/pdf/spill_costs/paper7.pdf
128. Everett, J. L.; Hax, A. C.; Lewinson, V. A. y Nutts, D. (1972). *Optimization of a Fleet of Large Tankers and Bulkers: A Linear Programming Approach*. Marine Technology, October : 430-438. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=f8e95b4f-8627-4185-b1b6-a8c15cf1355e>
129. Fagerholt, K. (2004). *A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling - Experience and future research*. Decision Support Systems 37(1):35-47 (Abril 2004) DOI: 10.1016/S0167-9236(02)00193-8. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/222659256_A_computer-based_decision_support_system_for_vessel_fleet_scheduling_-_Experience_and_future_research
130. Fagerholt, K. y Lindstad, H. (2007). *TurboRouter: An interactive optimisation-based decision support system for ship routing and scheduling*. Maritime Economics and Logistics, Vol. 9, pp. 214-233. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/5223645_TurboRouter_An_Interactive_Optimisation-Based_Ddecision_Support_System_for_Ship_Routing_and_Scheduling
131. Faghri, A. y Wahed, M.A. (2002). *Development of a Computer Simulation Model to Optimize the Operations of a Multipurpose Seaport*. Delaware Center for Transportation, Department of Civil and Environmental Engineer. University of Delaware (Delaware, Estados Unidos). 147 Páginas Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] <http://sites.udel.edu/dct/files/2013/10/Rpt.-135-Development-of-a-Computer-Simulation-Model-to-Optimize-the-Operations-of-a-Multipurpose-Seaport-z8dun9.pdf>
132. FICO (2009): *Mosel: An overview*. Fair Isaac Corporation. (California, Estados Unidos) 25 Páginas- Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://www.fico.com/en/node/8140?file=5017>
133. FICO (2013): *Getting Started with MOSEL*. Fair Isaac Corporation. San Jose (California, Estados Unidos) Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] http://www.maths.ed.ac.uk/hall/Xpress/FICO_Docs/mosel/mosel_ug/dhtml/moselugintro.html

-
134. Fisher, M. L. y Rosenwein, M. B. (1989). *An Interactive Optimization System for Bulk-Cargo Ship Scheduling*. Naval Research Logistics, vol 36(1): 27-42. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1002/1520-6750\(198902\)36:1<27::AID-NAV3220360103>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1520-6750(198902)36:1<27::AID-NAV3220360103>3.0.CO;2-0)
135. Fishbone, L.G. y Abilock, H. (1981). *Markal, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version*. International Journal of Energy Research, vol 5(4): 353-375. Disponible en [fecha de último acceso el 22.11.2016] DOI: [10.1002/er.4440050406](https://doi.org/10.1002/er.4440050406)
136. Flatberg, T.; Haavardtun, J.; Kloster, O- y Lokketangen, A. (2000). *Combining exact and heuristic methods for solving a vessel routing problem with inventory constraints and time windows*. Ricerca Operativa, Vol. 29, No. 91, pp. 55-68. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <https://www.sintef.no/en/publications/publication/?pubid=CRISTin+935034>
137. Flood, M. M. (1954). *Application of Transportation Theory to Scheduling a Military Tanker Fleet*. Operations Research, vol 2(1): 150-162. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/opre.2.2.150>
138. Fodstad, M.; Stremersch, G.; Hecq, S. y Lium A.G. (2010). *LNGScheduler: a rich model for coordinating vessel routing, inventories and trade in the liquefied natural gas supply chain*. The Journal of Energy Markets, Volumen 3(Número 4): Páginas 1-34. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] [https://www.researchgate.net/publication/249968121 LNGScheduler A rich model for coordinating vessel routing inventories and trade in the LNG supply chain](https://www.researchgate.net/publication/249968121_LNGScheduler_A_rich_model_for_coordinating_vessel_routing_inventories_and_trade_in_the_LNG_supply_chain)
139. Foss, B.A. y Halvorsen, I.J. (2009). *Dynamic optimization of the LNG value chain*. Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium. Editores: H. Alfadala, G.V. Rex Reklaitis y M.M. El-Halwagi © 2009 Elsevier B.V. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://www.ntnu.edu/documents/139834/7683624/conf-101.pdf>
140. Furman, K.C.; Song, J.-H.; Kocis, G.R.; McDonald, M.K. y Warrick, P.H. (2011). *Feedstock routing in the ExxonMobil downstream sector*. Interfaces, vol 41(2): 149-163. Disponible en [fecha de último acceso el 07.11.2016] <http://www.jstor.org/stable/23016240>
141. Fusco, P.M.; Sauri, S. y Spuch, B. (2010). *Quality indicators and capacity calculation for Ro-Ro terminals*. Transportation and Technology, vol 33(8): 695–717. Disponible en

- [fecha de último acceso el 27.05.2017]
<http://dx.doi.org/10.1080/03081060.2010.527179>
142. Galea, E.R. y Owen, M: (1994). *Predicting the Evacuation Performance of Mass Transport Vehicles. Fire Safety on Ships. Developments into the 21st Century*. Proceedings of the Institute of Marine Engineers, Science and Technology Conference (IMarE'94), Vol 106(2): 239 – 247, Londres (Reino Unido). ISBN 0-907206-57-3. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
 143. Galea, E.R.; Gwynne, S.; Blackshields, D.; Lawrence, P. y Filippidis, L. (2001). *Predicting the evacuation performance of passenger ships using computer simulation*. Proceedings of the 9th International Fire Science and Engineering Conference: Interflam'01, Vol. 2, pp: 853-864, Edimburgo (Escocia), 17-19 de Septiembre de 2001, publicado por Interscience Communications Ltd, London, UK, 2001. ISBN 0 95323129 1 (vol2). Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
 144. Galea E.R.; Filippidis L.; Gwynne S.; Lawrence, P.J. y Blackshields, D.(2002a). *Predicting the Performance of Passenger Ships using Computer Simulation*. Proceedings of the Fire Safety and Survivability, Applied Vehicle Technology (AVT) Panel Symposium, NATO Research and Technology Organisation, Aalborg (Dinamarca), 23-26 Septiembre de 2002, RTO-MP-092, (AVT-088), CD, paper 33, 14 páginas, publicado en Noviembre de 2003. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
 145. Galea, E.R.; Filippidis, L.; Gwynne, S.; Lawrence, P.; Sharp, G. y Blackshields, D. (2002b). *The Development of an Advanced Ship Evacuation Simulation Software Product and Associated Large Scale Testing Facility for the Collection of Human Shipboard Behaviour Data*. Proceedings of the International Conference on Human Factors in Ship Design and Operation, The Royal Institution of Naval Architects, Londres (Reino Unido), pp: 37-50. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
 146. Galea, E.R.; Gwynne, S.; Lawrence, P.; Blackshields, D.; Ewer, J.; Wang, N.; Hurst, N. y Mawhinney, N. (2003a). *Fire Safety Engineering and Ship Design Using Advanced Fire and Evacuation Simulation*. Proceedings of the 1st International Conference – Fire on Ships: Prevention, Detection and Control on Ships and Offshore Structures, 11-12 de marzo de 2003 Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
 147. Galea, E R; Gwynne, S.; Lawrence, P.; Blackshields, D.; Ewer, J.; Wang, N.; Hurst, N. y Mawhinney, N. (2003b). *The Application of Fire and Evacuation Simulation in Ship Design*. Proceedings of the 2nd International EuroConference on Computer and IT

-
- Applications in the Maritime Industries - COMPIT 2003, Hamburgo (Alemania), pp: 55-69. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
148. Galea E.R.; Lawrence, P.; Gwynne, S.; Filippidis, L.; Blackshields, D.; Sharp, G.; Hurst, N.; Wang, Z., y Ewer J. (2003c). *Simulating Ship evacuation under fire conditions*. Proceedings of the 2nd International Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference, (Editor: E.R.Galea), CMS Press, Greenwich, (Londres), ISBN 1904521088, pp159-172, Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
149. Galea, E.R.; Lawrence, P.; Gwynne, S.; Sharp, G.; Hurst, N.; Wang, Z. y Ewer, J. (2004). *Integrated fire and evacuation in maritime environments*. Proceedings of the 2nd International Maritime Safety Conference on Design for Safety, Sakai (Japon), Publicado por Ship and Ocean Foundation, 27-30 de Octubre de 2004, pp: 161-170. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
150. Galea, E.R.; Deere, S.; Brown, R., y Filippidis, L. (2012a). *An Evacuation Validation Data Set for Large Passenger Ships*. Proceedings of the 6th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics. 6-8 de Junio de 2012, Springer, New York, (Estados Unidos). pp.109-124, ISBN 978-3-319-02446-2. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] DOI:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02447-9_7, 2014
151. Galea, E.R.; Lohrmann, P.; Brown, R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012b). *Understanding human performance in ship evacuation*. The Journal of Ocean Technology, Extreme Survival, vol. 7(3): 1-7. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/fire/pub.asp>
152. GAMS (2017). *An Introduction to GAMS*. © GAMS Development Corporation, Washington DC (Estados Unidos) Disponible en [fecha de último acceso el 27.05.2017] <https://www.gams.com/>
153. Gharehgozi, A.H.; Roy, D. y de Koster, R. (2014). *Sea Container Terminals: New Technologies, OR models, and Emerging Research Areas*. ERIM Report Series Reference No. ERS-2014-009-LIS. DOI: 10.2139/ssrn.2469175. Disponible en [fecha de último acceso el 07.11.2016] repub.eur.nl/pub/51656/ERS-2014-009-LIS.pdf
154. Gharehgozi, A.H.; Roy, D. y de Koster, R. (2015). *Sea container terminals: New technologies and OR models*. Maritime Economics & Logistics 18(2): 103-140. doi:10.1057/mel.2015.3. Disponible en [fecha de último acceso el 07.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/276167788_Sea_container_terminals_New_technologies_and_OR_models

155. Gibson (2016). *Gas Carrier Register 2016*. Gibson Shipbrokers © 2016. ISBN 978-0-9935533-1-8.
156. Glen, I.F. y Galea, E.R. (2001). *Ship Evacuation Simulation: Challenges and Solutions*. *SNAME Transactions*, vol 109 (2001): 121-139. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=6fa92186-e538-4f8e-94ab-3da390fa628e>
157. Gorman, M.; Clarke, J.-P.; Gharehgozli, A.; Hewitt, M.; De Koster, R. y Roy, D. (2014). *State of the Practice: A Review of the Application of OR/MS in Freight Transportation*. Working Paper.
158. Gray, R. (1982). *Behavioural approaches to freight transport modal choice*. *Transport Reviews*, vol. 2(2):161-184. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] [DOI: 10.1080/01441648208716491](https://doi.org/10.1080/01441648208716491)
159. Greif, M. (1991). *The Visual Factory: Building Participation Through Shared Information*. Productivity Press, Cambridge, Mass. (Febrero 1991). ISBN-13: 978-0915299676 / ISBN-10: 0915299674. 306 Páginas.
160. Grigalunas, T.A.; Opaluch, J.J.; French, D.; Reed, M. y Knauss, D. (1988). *A natural resource damage assessment model for coastal and marine environments*. *GeoJournal* vol 16 (3): 315–321. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] [DOI: 10.1007/BF00270261](https://doi.org/10.1007/BF00270261)
161. Grønhaug, R. y Christiansen, M. (2009). *Supply Chain Optimization for the Liquefied Natural Gas Business*. *Innovations in Distribution Logistics. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer Berlin Heidelberg. Editado por Nunen, J.A.E.E., Speranza, M.G. y Bertazzi, L. Páginas 195- 218. Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-92944-4_10?no-access=true
162. Grønhaug, R.; Christiansen, M.; Desaulniers, G. y Desrosiers, J. (2010). *A branch-and-price method for a liquefied natural gas inventory routing problem*. *Transportation Science*, vol 44 (3): 400-415. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1100.0317>.
163. Guéret, C.; Prins, C. y Sevaux, M. (2005). *Applications of Optimization with Xpress-MP*. Dash Optimization Ltd, Blisworth, Reino Unido. 264 Páginas. ISBN: 0-9543503-0-8. . Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] http://www3.ntu.edu.sg/home/bernhard/lp/lp_book.pdf

-
164. Guimaraes, R.C. y Kingsman, B.G. (1989). *Simulation-optimization: the method and its application in the analysis of grain terminal operations*. European Journal of Operational Research 41(1):44–53. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90037-4. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017]. https://www.researchgate.net/publication/4756664_Simulation-optimisation_The_method_and_its_application_in_the_analysis_of_grain_terminal_operations
165. Gunnarsson, H.; Rönnqvist, M. & Carlsson (2006). *A combined terminal location and ship routing problem*. Journal of the Operational Research Society, vol 57(8): 928–938. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] [doi:10.1057/palgrave.jors.2602057](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602057)
166. Günther, H. O. y Kim, K. H. (2006). *Container terminals and terminal operations*. OR Spectrum 28(4)(2006). Páginas 437–445. DOI: 10.1007/s00291-006-0059-y. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 26-10-206]. https://www.researchgate.net/publication/226429109_Container_terminals_and_terminal_operations
167. Halvorsen-Weare, E. y Fagerholt, K. (2010). *Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints*. Annals of Operations Research 203(1). Páginas 1-20 · Marzo 2010. DOI: 10.1007/s10479-010-0794-y Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/225982700_Routing_and_scheduling_in_a_liquefied_natural_gas_shipping_problem_with_inventory_and_berth_constraints
168. Harrald, J.R.; Mazzuchi, T.A.; Spahn, J.; Van Dorp, R., Merrick, J.; Shrestha, S. y Grabowski, M. (1998). *Using system simulation to model the impact of human error in a maritime system*. Safety Science, vol 30(1-2): 235–247. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] DOI: 10.1016/S0925-7535(98)00048-4
169. Harris, A.G.; Holden, A.R.; Schroer, B.J. y Möeller, D.P.F. (2008). *A simulation approach to evaluating productivity improvement at a seaport coal terminal*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 2062(2062):19-24. DOI: 10.3141/2062-03. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/245563119_A_Simulation_Approach_to_Evaluating_Productivity_Improvement_at_a_Seaport_Coal_Terminal

-
170. Heilig, L. y Voß (2016). *Information systems in seaports: a categorization and overview*. Information Technology and Management, pp: 1- 23. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] DOI: [10.1007/s10799-016-0269-1](https://doi.org/10.1007/s10799-016-0269-1)
171. Hennig, F.; Nygreen, B.; Christiansen, M. y Warrick, P.H. (2012). *Maritime crude oil transportation - A split pickup and split delivery problem*. European Journal of Operational Research vol 218(3):764-774. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] DOI: [10.1016/j.ejor.2011.09.046](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.046)
172. Hitchcock, F. (1941). *The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities*. Journal of Mathematics and Physics, vol 20 (1-4): 224-230. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] DOI: [10.1002/sapm1941201224](https://doi.org/10.1002/sapm1941201224).
173. Hockney, L.A. (1979), *Port Handbook for Estimating Marine Terminal Cargo Handling Capability*. U.S. Department of Commerce, Maritime Administration, Office of Port and Intermodal Development. 224 Páginas.
174. Hockney, L.A. y Whiteneck, L.L. (1986), *Port Handbook for Estimating Marine Terminal Cargo Handling Capability*. Moffatt & Nichol, Engineers para . U.S. Department of Commerce, Maritime Administration, Office of Port and Intermodal Development, 224 Páginas.
175. Hooghiemstra, J.S.; Kroon, L.G.; Odijk, M.A. y Christiansen, M. (1999). *Decomposition of a combined inventory and time-constrained ship routing problem*. Transportation Science, Vol. 33, No. 1, pp. 3-16. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/262167903_Decomposition_of_a_Combined_Inventory_and_Time_Constrained_Ship_Routing_Problem
176. Hsu W.-K. W. y Chen J.Y. (1997). *The procurement and shipping policy of imported blending coals*. Recurso en red no publicado. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017]. [http://web.idv.nkmu.edu.tw/~khsu/main/paper/conference/2004Shipping%20and Procurement.pdf](http://web.idv.nkmu.edu.tw/~khsu/main/paper/conference/2004Shipping%20and%20Procurement.pdf).
177. Hua, E. (2013). *Growing pains at China's top ro-ro port*. Automovie Logistics (recurso en línea). Disponible en [fecha de último acceso el 20.05.2017] <http://automotivelogistics.media/intelligence/navigating-growth-at-chinas-top-ro-ro-ports#4>
178. Huang, C. y Karimi, I.A. (2006a). *Scheduling Tanker-Lightering Operations in Crude Oil Transportation*. Industrial & Engineering Chemistry Research 45(24). Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie060379j](https://doi.org/10.1021/ie060379j)

-
179. Huang, C. y Karimi, I.A. (2006b). *Scheduling Transshipment Operations in Maritime Chemical Transportation*. Industrial & Engineering Chemistry Research vol 45(6):1955-1973. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie050840s](https://doi.org/10.1021/ie050840s)
180. Hudlicka, E. (1996). Requirements Elicitation with indirect knowledge Elicitation Techniques: Comparison of three methods. Proceedings of the International Conference on Requirement Engineer - ICRE'96, pp: 4-11, Colorado Springs (Colorado, Estados Unidos), 15 a 18 de abril de 1996. ISBN: 0-8186-7252-8. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICRE.1996.491424>. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://www.panda.sys.t.u-tokyo.ac.jp/kushiro/ReferencePaper/Requirements%20Elicitation/00491424.pdf>
181. Hudlicka, E. (1997). Summary of Knowledge Elicitation Techniques for Requirements Analysis, Course Material for Human Computer Interaction. Worcester Polytechnic Institute.
182. Hwang, S. (2005). *Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk*. School of Industrial and Systems Engineering. Master Thesis. Georgia Institute of Technology (Georgia, Estados Unidos). Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/6928/Hwang_Seungjune_200505_phd.pdf;sequence=1
183. Iakovou, E.; Douligieris, C.; Li, H.; Ip, C. y Yudhbir, L. (1999). *A maritime global route planning model for hazardous materials transportation*. Transportation Science, vol 33(1): 34-48. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] DOI: [10.1287/trsc.33.1.34](https://doi.org/10.1287/trsc.33.1.34)
184. Iakovou, E.T. (2001). *An interactive multiobjective model for the strategic maritime transportation of petroleum products: risk analysis and routing*. Safety Science, vol 39 (1-2): 19-29. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1016/S0925-7535\(01\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00022-4)
185. Ierapetritou, M. G. y Floudas, C. A. (1998a). *Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling: Multipurpose: 1. Batch Processes*. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol 37(11): 4341-4359. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie970927g](https://doi.org/10.1021/ie970927g)
186. Ierapetritou, M. G. y Floudas, C. A. (1998b). *Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling: 2. Continuous and Semicontinuous Processes*. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 37(11): 4360-4374. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie9709289](https://doi.org/10.1021/ie9709289)

-
187. IGU (2016). *IGU World Gas LNG Report – Edition 2016*. International Gas Union (IGU) Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] <http://www.igu.org/publications/2016-world-lng-report>
188. INTERCARGO (2016). *Dry Bulk Trades: Industry Statistics*. Copyright © Intercargo (2016) Disponible en [fecha de acceso el 30-11-2016] <http://www.intercargo.org/en/industry/58-trades.html#industry-statistics>
189. Jagathy, R., Bhasi. M. y Acharya, D. (2001). Optimization of the barge mix for raw material ship lightering and HRC loading into export ships for a new coastal integrated steel plant. Proceedings of 1st International Conference on Logistic and Supply Chain Management. Coimbatore: PSG College of Technology, 2001; Páginas 6–8. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/261179722_Optimization_of_Barge_mix_for_Raw_Material_Ship_Lightering_and_HRC_Loading_into_Export_Ships_for_a_New_Coastal_Integrated_Steel_Plant
190. Jagathy, R. y Acharya, D. (2007). A decision support system for raw materials procurement and finished goods supply logistics of a coastal integrated steel plant. Recurso no público disponible en red.). Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/researcher/2093445557_D_Acharya
191. Jaswar, Sanusi, Siow, C.L. y Wati A. (2012). *Optimization of rounded-shape floating LNG supply chain efficiency with simulation modelling*. Recent Advances in Automatic Control, Modelling and Simulation. - International Conference on Marine Technology, 2012 Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Morioka/ACMS/ACMS-03.pdf>
192. Jetlund, A.S. y Karimi, I.A. (2004). *Improving the logistics of multi-compartment chemical tankers*. Computers & Chemical Engineering, vol. 28(8): 1267-1283. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1016/j.compchemeng.2003.08.009](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.08.009)
193. Jhonson, J.G. y Busemeyer, J. (2001). *Multiple-Stage Decision-Making: The effect of planning horizon length on dynamic consistency*. Theory and Decision 51(2001). Páginas 217–246. (© 2002 Kluwer Academic Publishers). Disponible en [fecha de última consulta el 15.11.2016] http://www.users.miamioh.edu/johnsojg/lab/papers/JB_TD01.pdf
194. JICA (2007). *The Feasibility Study on the Development of Road RO-RO Terminal System for Mobility Enhancement in the Republic of the Philippines*. Japan International Cooperation Agency (JICA). Department of Transportation and

-
- Communications (DOTC). 81 páginas. Disponible en [fecha de última consulta el 27.05.2017] http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/11866654_01.pdf
195. Jin, C.; Ren, Y. ; Higuchi, Y. y Ito, H. (1999). *Optimum Design for Port Logistics System for Bulk Cargo with Fuzzy Set Theory*, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol.65-635, C(1999-7), pp 3010-3017 (in Japanese) (1999). Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/275490545_Optimum_Design_for_Port_Logistics_System_for_Bulk_Cargo_with_Fuzzy_Set_Theory
196. Kao, C.; Chen, C.Y. y Lyu, J. (1993). *Determination of optimal shipping policy by inventory theory*. International Journal of Systems Science 24(7) (Julio 1993). Páginas: 1265-1273. DOI: 10.1080/00207729308949558. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017]. https://www.researchgate.net/publication/233312027_Determination_of_optimal_shipping_policy_by_inventory_theory
197. Kaptein, R. (2013). *Bulk Terminal Planning Trends – Using Simulation*. Moffat and Nichol Inc. Long Beach, California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://aapa.files.cms-plus.com/SeminarPresentations/2013Seminars/13TerminalTraining/Kaptein%20%20Robert.pdf>.
198. Keceli, Y.; Aksoy, S. y Volkan, Y. (2013). *A simulation model for decision support in Ro-Ro terminal operations*. International Journal of Logistics Systems and Management, vol 15(4): 338-358. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.054896>. Disponible en [fecha de último acceso el 27.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/262945353_A_simulation_model_for_decision_support_in_Ro-Ro_terminal_operations
199. Keceli, Y. (2016). *A simulation model for gate operations in multi-purpose cargo terminals*. Maritime Policy & Management , vol.43(8): 945-958. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2016.1169448>
200. Kelly, G. (1955). *The Psychology of Personal Constructs*. New York: Norton. Vols. 1 & 2, New York: W. W. Norton. 424 Páginas. ISBN 0415037972, 9780415037976
201. Kendall, D. G. (1953). *Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain*. The Annals of Mathematical Statistics. Vol 24 (3): 338-354. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] doi:10.1214/aoms/1177728975. JSTOR 2236285.

202. King, D.H.; Radomske, B.A. y Manocha, G.S. (1993). *Recent advances in simulation models for bulk terminal design*. Bulk Solids Handling 13(1): 23–27. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/295390299_Recent_advances_in_simulation_models_for_bulk_terminal_design
203. Kobayashi, K. (2010). *A Linear Approximation of the Value Function of an Approximate Dynamic Programming Approach for the Ship Scheduling Problem*. Lecture Notes in Computer Science – Proceedings of the 4th International Conference on Learning and Intelligent Optimization, Venecia (Italia), 18-22 de Enero de 2010. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] DOI: 10.1007/978-3-642-13800-3_14
204. Kobayashi, K. y Kubo, M. (2010). *Optimization of oil tanker schedules by decomposition, column generation, and time-space network techniques*. Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics vol 27(1):161-173. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] DOI: 10.1007/s13160-010-0008-7
205. König, T.M.; Klüpfel, H. y Schreckenberg, M. (2002). *Assesment and Analisis of Evacuation Processes on Passangers Ships by Microscopic simulation*. Pedrestian and evacuation Dynamics. (Editado por Michael Schreckenberg y Som Deo Sharma). Springer-Verlag - Berlin Heidelberg, pp. ISBN 978-3-642-07658-9 (452 Páginas) , pp: 297-302. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/235741952_Assessment_and_Analysis_of_Evacuation_Processes_on_Passenger_Ships_by_Microscopic_Simulation
206. Kontovas, C.A., Psaraftis, H.N., Ventikos, N.P., 2010. *An empirical analysis of IOPCF oil spill cost data*. Marine Pollution Bulletin 60(9): 1455-1466. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.05.010. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/44667154_An_empirical_analysis_of_IOPCF_oil_spill_cost_data
207. Korsvik, J.E; Fagerholt, K. y Laporte, G. (2009). *Tabu search heuristic for ship scheduling problems*. Working Paper. Recurso no publicado. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <https://documents.epfl.ch/users/b/bi/bierlair/dropbox/TRISTAN/091Korsvik.pdf>
208. Korsvik, J.E y Fagerholt, K. (2010). *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling with flexible cargo quantities*. Journal of Heuristics. Volumen 16, Número 2, Páginas 117–137 (Abril 2010). Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10732-008-9092-0?no-access=true>
209. Korsvik, J.E; Fagerholt, K. y Laporte, G. (2010). *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling*. Journal of the Operational Research Society –Volumen 61, Número 4,

-
- Página 594–603 (Abril 2010). Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fjors.2008.192>
210. Kruskal, J. B. (1964). *Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis*. Psychometrika. Vol 29 (1): 1–27. [doi:10.1007/BF02289565](https://doi.org/10.1007/BF02289565)
 211. Kuwahara, N.; Bajay, S.V. y Castro, L.N. (2000). *Liquefied natural gas supply optimization*. Energy Conversion and Management, Volumen 41(número 2). Páginas: 153-161. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001053>
 212. Iannone, R.; Miranda, S.; Prisco, L. y Sarno, D. (2016). *Proposal for a flexible discrete event simulation model for assessing the daily operation decisions in a Ro-Ro terminal*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol 61(1): 28-46. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 21.05.2017] [DOI: 10.1016/j.simpat.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.11.005)
 213. Lai, G.; Wang, M.X.; Kekre, S.; Scheller-Wolf, A. y Secomandi, N. (2011). *Valuation of Storage at a Liquefied Natural Gas Terminal*. Operations Research 59(3). Páginas: 602-616 · Junio 2011. DOI: 10.2307/23013130. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/220244362_Valuation_of_Storage_at_a_Liquefied_Natural_Gas_Terminal
 214. Lai, C.H. y Sun, P.Y. (2010). *Queuing pricings to bulk carriers at the anchorage*. Asian Transport Studies, 2010, 1(1), 62-75. (2010). Disponible en [fecha de último acceso el 03-12-2016] https://www.researchgate.net/publication/228455422_Queuing_Pricings_to_Bulk_Carriers_at_the_Anchorage
 215. Lambert, D.M., 2001. *The supply chain management and logistics controversy* Handbook of Logistics and Supply Chain management (A.M. Brewer, J.K. Button y D.A. Hensher, ed.), Oxford: Pergamon, pp.99-125. 10.1108/9780080435930-007 Disponible en [fecha de último acceso 27.05.2017] <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/9780080435930-007>
 216. Lee, H.; Pinto, J.N.; Grossmann, I. E. y Park, S- (1996). *Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil un-loading with inventory management*. Ind. Eng. Chem. Res., vol. 35, no.5, pp. 1630–1641, 1996. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/231391639_Mixed-Integer_Linear_Programming_Model_for_Refinery_Short-Term_Scheduling_of_Crude_Oil_Unloading_with_Inventory_Management

-
217. Li, H.; Iakovou, E. y Douligeris, C. (1996). *Strategic planning model for marine oil transportation in the Gulf of Mexico*. Transportation Research Record, vol 1522(1): 108–115. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: 10.3141/1522-15
218. Ligteringen, H. (2000). *Ports and Terminals – Lecture notes*. CTwa4330-5306, Delft University of Technology, Delft.
219. Lin, X.; Chajakis, E.D. y Christodoulos, A.F. (2003). *Scheduling of Tanker Lightering via a Novel Continuous-Time Optimization Framework*. Industrial & Engineering Chemistry Research 42(20): 4441-4451. DOI: 10.1021/ie0205400. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/231370668_Scheduling_of_Tanker_Lightering_via_a_Novel_Continuous-Time_Optimization_Framework
220. Liu, C.-M. y Sherali, H.D. (2000). *A coal shipping and blending problem for an electric utility company*. Omega. Volumen 28 (4) (Agosto 2000). Páginas 433–444. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048399000675>
221. Liu, H.-B. y Zhang, Z.P. (2006). *Enlightenment concerning design of modern specialized automobile Ro/Ro wharf*. Port & Motorway Engineering, vol 10(1): 91–93. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://www.airitilibrary.com/Publication/alDetailedMesh?docid=10024972-200610-2006-10-91-93-a>.
222. Lodewijks, G.; Schott, D. y Ottjes, J.A. (2009). *Modern dry bulk terminal design*. Port Technology International 43 (2009). Páginas 87-94. Presentado en Proceedings of Beltcon 14 Conference, South Africa, Disponible bajo petición en [fecha de acceso el 30-11-2016] https://www.researchgate.net/publication/297828850_Modern_dry_bulk_terminal_design-
223. Long, Y.; Zhang, G. (2010). *General design of professional automobile Ro-Ro terminals*. Port & Waterway Engineering vol 2010(6):64-67. Disponible en [fecha de último acceso el 20.05.2017] http://caod.oriprobe.com/articles/24145508/General_design_of_professional_automobile_Ro_Ro_terminals.htm
224. López, A. (2002). *Simulación del movimiento de personas a bordo. Aplicación a situaciones de emergencia*. Jornadas Universidad Politécnica de Madrid – Fuerzas Armadas, Madrid (España).

-
225. López, A. y Pérez F. (2002). *Models and tools for the ship evacuation simulation*. Proceedings of the 3rd International Congress on Maritime Technological Innovations and Research. Bilbao, España.
226. López, A. y Pérez F. (2003a). *Designer and marter aids to improve the evacuation of passanger ships*. Proceedings of the World Maritime Thecnical Conference. San Francisco, Estados Unidos. 17-20 Octubre 2003. Editado por SNAME (The International Community for Maritime and Ocean Professionals). <http://www.sname.org/pubs/viewtechnicalpaper?DocumentKey=6a530c24-996a-4134-8cdf-4e0d966ade66>
227. López, A. y Pérez F. (2003b). *Ship evacuation optimization. Tools for master and designers aid*. Proceedings of the 2nd International Conference in Pedrestrian and Evacuation Dynamics (PED'03), Londres (Reino Unido). 20-22 de Agosto de 2003.
228. López, A.; Pérez, F.; Donoso, R. y Torres, R. (2004) *Ship pedrestian flow simulation. The Sifbup-S application*. Capítulo 2 en Automatisation for the Maritime Industries (editado por Joaquín Aranda Galleo, Manuel Armada y Jesús Manuel de la Cruz). Instituto de Automática Industrial. Madrid (España). pp: 23-41. ISBN 8460933156, 9788460933151. 273 páginas. Disponible en [fecha de últiumo acceso el 29.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/263580947_Automation_for_the_Maritime_Industries
229. López, A. (2005). Simulación del flujo de personas y vehículos en buques de pasaje: Proyecto SIFBUP. Ingeniería Naval, vol 74 (2005): 93–104.
230. López, A.; Pérez, F., Donoso, R., y Torres, R. (2005). *Simulation of Passengers Movement on Ship Emergencies. Tools for IMO Regulations Fulfiment*. Journal of Maritime Research , vol II(1): 1005-125. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/28100108_Simulation_of_passengers_movement_on_ship_emergencies_tools_for_IMO_regulations_fulfilment
231. Lu, J.; Fu, M. y Sha, J. (2005). *Research of import iron ore logistics system based on the minimum cost theory*. Proceedings of International Conference on Services Systems and Services Management, 1, 391–396. Disponible en [fecha de acceso el 30-11-2016] https://www.researchgate.net/publication/4169199_Research_of_import_iron_or_e_logistics_system_based_on_the_minimum_cost_theory
232. Luo, J.; Wu, Y.; Halldorsson, A. y Song, X. (2011). *Storage and stacking logistics problems in container terminals*. OR Insight 24. pp:256–275. Disponible en [fecha de último acceso el 07.11.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/220438579_Storage_and_stacking_logistics_problems_in_container_terminals
233. Madansky, A. (1960). *Inequalities for stochastic linear programming problems*. Management Science 6 (1960) 197-204. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://www.im-uff.mat.br/puc-rio/disciplinas/2006.1/soe/arquivos/mandansky-management-science-1960.pdf>
 234. Maksimavicius, R. (2004). *Some elements of the Ro-Ro terminals*. Transport-2004, vol 19(2): 75–81. Disponible en [fecha de último acceso el 27.05.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/16484142.2004.9637957>
 235. Mai, Y.J.Y. (2007). *Analysis on the development of Ro/Ro system for domestic sea port*. Research on Waterborne Transportation, vol 1(1): 6–8. Disponible en [fecha de último acceso el 27.05.2017] http://caod.oriprobe.com/articles/11905536/Analysis_on_the_Development_of_Ro_Ro_System_for_Domestic_Sea_Port.htm
 236. Mangan, J.; Lalwani, C. y Gardner, B. (2002). *Modelling port/ferry choice in Ro-Ro freight transportation*. International Journal of Transport Management, Vol. 1(1): 15–28. Disponible en [fecha de último acceso el 27.05.2017] DOI: [10.1016/S1471-4051\(01\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S1471-4051(01)00003-9)
 237. Marón, A.; Valle, J.; Riola, J.M.; Quesada, T. y Henríquez, F. (2002). *Evacuación de buques de pasaje: Necesidades e investigación*. Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Ministerio de Defensa. XLI Sesiones Técnicas de Ingeniería Civil. Gijón (España). Junio de 2002. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] http://www.cehipar.es/_files/users/publicaciones/164.pdf
 238. Martínez, L.J. y Lambert, J.H. (2010). *Prioritising sources of risk at liquefied natural gas storage terminals in Mexico*. International Journal of Business Continuity Risk Management, vol. 1(4): 363–383. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] DOI: [10.1504/IJBCRM.2010.038624](https://doi.org/10.1504/IJBCRM.2010.038624)
 239. Masaaki, I. (1986). *Kaizen: The Key to Japanese Competitive Success*. McGraw-Hill Education (New York, Noviembre 1986). 260 Páginas. ISBN-10: 007554332X / ISBN-13: 978-0075543329.
 240. Matear, S. y Gray, R. (1993). *Factors Influencing Freight Service Choice for Shippers and Freight Suppliers*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol. 23(2):25-35. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] DOI: [10.1108/0960003931003819](https://doi.org/10.1108/0960003931003819)

-
241. Matsushita, S. (1992). *A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement with Queuing*, Journal for Architecture, Planning, and Environmental Engineering, n° 432 (1992): 79-92.
242. Mattfeld, D.C. y Kopfer, H. (2003). *Terminal operations management in vehicle transshipment*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 37(5): 435–452. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00035-6)
243. Mattfeld, D.C. (2006). *The management of Transshipments Terminals: Decision Support for Terminal Operations in Finished Vehicle Supply Chains*. » Operations Research/Computer Science Interfaces Series Computer Science Interfaces Series, Vol. 34. 174 Páginas. ISBN 978-0-387-30853-1
244. McGinnis, M.A. (1979). *Shipper Attitudes Toward Freight Transportation Choice: A Factor Analytic Study*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol. 10(1): 25-34. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] DOI: [10.1108/eb014464](https://doi.org/10.1108/eb014464)
245. McKay, M. D. y Hartley, H. O. (1974). *Computerized Scheduling of Seagoing Tankers*. Naval Research Logistics Quarterly, 21: 255-264. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] DOI: [10.1002/nav.3800210205](https://doi.org/10.1002/nav.3800210205)
246. Mendez, C.A.; Grossmann, I.E.; Harjunkoski, I. y Kaboré, P. (2004). *Optimizacion techniques for blending and scheduling of oil-refinery operations* 41 Páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://egon.cheme.cmu.edu/Papers/CarlosBlendingABB%20Paper-pub.pdf>
247. Mendez, C.A.; Grossmann, I.E.; Harjunkoski, I. y Kaboré, P. (2006). *A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations*. Computers & Chemical Engineering. Volumen 30, Issue 4, (15 February 2006), Páginas 614–634. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135405002966>
248. Merrick, J.R.W.; van Dorp, J.R.; Harrauld, J.; Mazzuchi, T.; Spahn, J.E. y Grabowski, M. (2000). *A systems approach to managing oil transportation risk in Prince William Sound*. System Engineering, vol 3 (3): 128–142. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] DOI: [10.1002/1520-6858\(200033\)3:33.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1520-6858(200033)3:33.0.CO;2-R)
249. Merrick, J.R.W.; van Dorp, J.R.; Blackford, J.P.; Shaw, G.L.; Harrauld, J. y Mazzuchi, T.A. (2003). *A traffic density analysis of proposed ferry service expansion in San Francisco Bay using a maritime simulation model*. Reliability Engineering & System Safety, vol 81(2): 119-132. Disponible en [fecha de último

- acceso el 22.04.2017] Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <https://www2.gwu.edu/~icdr/publications/RESS2003.pdf>
250. Minitorn (1997). *Activity Di Agram Cycle*. Recurso en línea de Tallin University (Tallin, Estonia). Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://minitorn.tlu.ee/~jaagup/uk/ds/chp3/CHAP3P~1.HTM>
 251. Moller, T., Parker, H.D. y Nichols, J.A. (1987). *Comparative costs of oil spill cleanup techniques*. Proceedings of the 1987 International Oil Spill Conference: Prevention, Behavior, Control, Cleanup (IOSC'87); 6-9 de Abril de 1987; Baltimore, Maryland (Estados Unidos), vol 1: 123–127. <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1987-1-123> Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://ioscproceedings.org/doi/pdf/10.7901/2169-3358-1987-1-123>
 252. Mondragon, A.E.C.; Lalwani, S.C.; Mondragon E.S.C.; Mondragon C.E.C. y Pawar, K.S. (2012). Intelligent transport systems in multimodal logistics: a case of role and contribution through wireless vehicular networks in a sea port location. *International Journal of Production Economics* 137(1): Páginas 165–175. Disponible en [fecha de última consulta el 26-10-2016] http://ac.els-cdn.com/S0925527311004683/1-s2.0-S0925527311004683-main.pdf?_tid=ab963e80-abed-11e6-a3ba-00000aab0f02&acdnt=1479294975_fb5bf1fdbf737b6d37d282443a8352d8
 253. Moraes, L.A.M. y Faria, L.F.T. (2016). *A stochastic programming approach to liquefied natural gas planning*. *Pesquisa Operacional*. Volumen 36 no.1 Rio de Janeiro (Enero-Abril 2016). <http://dx.doi.org/10.1590/0101-7438.2016.036.01.0151>. Print version ISSN 0101-7438 On-line version ISSN 1678-5142 Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382016000100151
 254. Mudrageda, M.V.; Murphy, F.H. y Welch, S. (2004). *Developing Strategies for Maritrans' Business Units*. *Interfaces*, vol 34(2): 149-161. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://www.jstor.org/stable/25062889>
 255. Mudrageda, M.V. y Murphy, F.H. (2008). *An Economic Equilibrium Model of the Market for Marine Transportation Services in Petroleum Products*. *Operations Research*, vol 56(2): 278-285. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] [doi>10.1287/opre.1070.0446](https://doi.org/10.1287/opre.1070.0446)
 256. Muravev, D.; Aksoy, S.; Rakhmangulov, A. y Aydogdu, V. (2016). *Comparing model development in discrete event simulation on Ro-Ro terminal example*. *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol 24(3): 283-297. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: [10.1504/IJLSM.2016.076890](https://doi.org/10.1504/IJLSM.2016.076890)

-
257. Murphy, P.R.; Daley, J.M. y Dalenberg, D.R. (1992). *Port Selection Criteria: An Application of a Transportation Research Framework*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, vol. 8(3): 237-255. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/279619113_Port_selection_criteria_An_application_of_a_transportation_research_framework
258. Murphy, P.R. y Hall, P. (1995). *The Relative Importance of Cost and Service in Freight Transportation Choice Before and After Deregulation: An Update*. Transportation Journal, vol 35(1):30-38. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/268871065_The_Relative_Importance_of_Cost_and_Service_in_Freight_Transportation_Choice_Before_and_After_Deregulation_An_Update
259. Murty, K.G.; Liu, J.; Wan, Y.W. y Linn, R. (2005). *A decision support system for operations in a container terminal*. Decision Support Systems 39(3): 309–332.
260. Munisamy (2010). Timber terminal capacity planning through queuing theory. Maritime Economics & Logistics, vol. 12(2): 147–161. Disponible en [fecha de última consulta el 01.06.2017] DOI: 10.1057/mel.2010.3
261. Nakajima, S. y Bodek, N. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press, 11th Printing Edition. Portland, Ore. (October 1988). 129 Páginas. ISBN-10: 0915299232 / ISBN-13: 978-0915299232
262. NASA (1966). *Procedure for Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). RA-006-013-1A. Retrieved 2010-03-13.
263. NASA (1995). *NASA Systems Engineering Handbook*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Technical Report. SP-610S. 164 Páginas. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] http://spacecraft.ssl.umd.edu/design_lib/Systems_Eng_Handbook.pdf
264. Nemhauser, G. L. y Yu, P. L. (1972). *A Problem in Bulk Service Scheduling*, Operations Research, vol 20 (4): 813-819. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/opre.20.4.813>
265. Nešetřil, J.; Milková, E. y Nešetřilová, H. (2001). *Otakar Borůvka on minimum spanning tree problem Translation of both the 1926 papers, comments, history*. Discrete Mathematics, vol. 233(1-3):3-36. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] DOI: 10.1016/S0012-365X(00)00224-7

266. Nikolay, K. (2014). *System Analysis and Simulation Modeling as the Basis for Unique Design of Port Terminals for Bulk Handling*, Advanced Materials Research, Vols. 945-949, pp. 2907-2910, 2014. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/269366386_System_Analysis_and_Simulation_Modeling_as_the_Basis_for_Unique_Design_of_Port_Terminals_for_Bulk_Handling
267. Noritake, M. y Kimura, S. (1983a). *Congestion Cost and Pricing of Seaports*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 111(2): 354-370. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(354\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(354))
268. Noritake, M. y Kimura, S. (1983b). *Optimum Number and Capacity of Seaport Berths*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 109(3): 323-339. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1983\)109:3\(323\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1983)109:3(323))
269. Noritake, M. y Kimura, S. (1990). *Optimum Allocation and Size of Seaports*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol 116(2): 287-299. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1990\)116:2\(287\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1990)116:2(287))
270. Ofiara, D.D. (2002). Natural resource damage assessments in the United States: rules and procedures for compensation from spills of hazardous substances and oil in waterways under US jurisdiction. Marine Pollution Bulletin, vol 44 (1): 96–110. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00263-6)
271. Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*. Productivity Press, Portland, Ore., 1988. 566 Páginas. ISBN-10: 143982097X / ISBN-13: 978-1439820971
272. Okazaki, S. (1979a). A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 1: Pedestrian Movement by the Application of Magnetic Models. Transactions of Architectural Institute of Japan, nº 283 (1979): 111-119.
273. Okazaki, S. (1979b). A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 2 : Concentrated Pedestrian Movement. Transactions of Architectural Institute of Japan, nº 284 (1979): 120-137.
274. Okazaki, S. (1979c). A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 3: Along the Shortest Path, Taking Fire. Congestion and Unrecognized

-
- Space into Account. Transactions of Architectural Institute of Japan, nº 285 (1979): 137-147
275. Okazaki, S. y Matsushita, S. (1993). *A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing*. 10 páginas. Department of Architecture and Environmentall Design, Architecture and Environmentall Engi-neering, Kyoto University, Kyoto (Japón) y Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui /Japón). Recurso en línea. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] <http://www.mukogawa-u.ac.jp/~okazaki/OK/PMOVE/paper1/London.pdf>
276. Öñüt, S. y Saglam, C.Ö. (2007) *Modelling and Optimization of General Cargo Port Operations through fuzzy minimal spanning three and fuzzy dynamic programming approaches*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Volume 4 (8): 1835-1851. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] <http://www2.kuma.u-tokai.ac.jp/~shi/07-147-1.pdf>
277. Özkan, E.D.; Nas, S. y Güler, N. (2016). *Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method*. The Asian Journal of Shipping and Logistics, volumen 32(3): 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2016.09.002>. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 27.05-2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209252121630044X>
278. Ottjes, J.A. y Lodewijks, G. (2004). *Reliability of large scale conveyor systems*. Proceedings of the International Industrial Simulation Conference (ISC 2004), June, 2004, Malaga (Spain). Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://wbmttt.tudelft.nl/users/duinkerker/papers/mal0406a.pdf>
279. Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. y Schott D.L. (2007). *Bulk terminal modelling and simulation*. Proceedings of the 5th International Industrial Simulation Conference (ISC 2007), June 13-15, 2007, Delft (The Netherlands). Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://wbmttt.tudelft.nl/users/duinkerker/papers/LOGIS-07%20Delft%202007.pdf>
280. Özelkana, E.C.; D'Ambrosio, A. y Tenga. S.G. (2008). *Optimizing liquefied natural gas terminal design for effective supply-chain operations*. International Journal of Production Economics. Volumen 111, Numero 2, Febrero 2008, Páginas 529–542. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527307000977>

281. Park, C. S. y Noh, Y.D. (1987a). *A port simulation model for bulk cargo operations*. SIMULATION Volumen 48. Número 6. Páginas 236-246. doi>10.1177/003754978704800605. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://sim.sagepub.com/content/48/6/236>
282. Park, C. S. y Noh, Y.D. (1987b). *An interactive port capacity expansion simulation model*. Engineering Costs and Production Economics 11(1):109-124 · Febrero 1987. DOI: 10.1016/0167-188X(87)90034-6. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/222206709_An_interactive_port_capacity_expansion_simulation_model
283. Park, N.-k.; Yoon, D.-g. y Park, S.-k. (2013). *Study on performance indicators at seaport*. Proceedings of the 6th International Conference of Asian Shipping and Logistics, pp.257-268.
284. Park, N.-k.; Yoon, D.-g. y Park, S.-k. (2014). *Port Capacity Evaluation Formula for General Cargo*. The Asian Journal of Shipping and Logistics, vol 30(2): 175-192. Park, N.-k.; Yoon, D.-g. y Park, S.-k. (2014). *Port Capacity Evaluation Formula for General Cargo*. The Asian Journal of Shipping and Logistics, vol 30(2): 175-192. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2014.09.003>
285. Perakis, A. N. y Bremer, W.M. (1992). *An operational tanker scheduling optimization system: Background, current practice and model formulation*. Maritime Policy & Management vol 19(3):177-187. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] DOI: 10.1080/751248659
286. Pérez, F. y López, A. (2001). *A 2D model to study evacuation of ship passengers*. Proceedings of the 2nd International Conference Navys and Shupbuilding Nowadays (NSN'2002), San Petesburgo (Rusia).
287. Pérez, F. y López, A. (2003). *A cellular models applied to the evacuation of ship passengers*. Proceedings of the International Congress on Ship and Shipping Research. Palermo (Italia)
288. Pérez, F.; López, A.; Péter, E. y Donoso, S. (2005). *Simulación del Movimiento de Personas. Aplicación a la Evacuación de Buques*. Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial (RIAI), vol 2(4): 78-88. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/28141917_Simulacion_del_Movimiento_de_Personas_Aplicacion_a_la_Evacuacion_de_Buques

-
289. Pérez, F. (2008). *La evacuación de buques de guerra. Estudio del Movimiento de Personas en Situaciones de Emergencia*. Tesis Doctoral. Departamento de Arquitectura y Construcciones Navales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España). Director: Jose María Arriola Rodríguez. 254 Páginas Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017]
http://oa.upm.es/1874/1/FRANCISCO_JAVIER_PEREZ_VILLALONGA.pdf
290. Persson, J. A. y Göthe-Lundgren, M. (2005). *Shipment planning at oil refineries using column generation and valid inequalities*. European Journal of Operational Research, vol 163(3): 631-652. Disponible en [fecha de último acceso el 25-12-2013]
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.02.008>
291. Popa, A. y Strer, J. (2016). *Analysis of Passenger and Vehicle Flows with Microscopic Simulations as a Result of Security Checks at Ferry Terminals*. Transportation Research Procedia. Volumen 14, 2016, pp: 1384-1393. Disponible en [fecha de último acceso el 27.05.2017]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516302137>
292. Psarros, G.; Skjong, R. y Vanem, E. (2011). *Risk acceptance criterion for tanker oil spill risk reduction measures*. Marine Pollution Bulletin 62(1):116-127. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.09.003. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017]
https://www.researchgate.net/publication/47298568_Risk_acceptance_criterion_for_tanker_oil_spill_risk_reduction_measures
293. Racero, J.; Eguía, I. y Canca J.D. (2013). *Simulación de eventos discretos*. Grupo de Tecnologías de la información e Ingeniería de Organización. Departamento de organización industrial y Gestión de empresas. Disponible en [fecha de último acceso el 25-12-2013]
http://italica.us.es/asignaturas/Simulacion/PROBLEMAS_DE_SIMULACION_ALU.PDF.
294. Raiffa, H. y Schlaifer, R. (1961). *Applied statistical decision theory*. Harvard Business School, Boston, MA (1961) Páginas 88-92. (Publicado el 15 de Mayo de 2000 H. Raiffa y Schlaifer, R. (2000). *Applied statistical decision theory* en por Wiley-Interscience; 1st edition (356 pages). ISBN-10: 047138349X y ISBN-13: 978-0471383499.
295. Rakke, J.G.; Stålhan, M.; Moe, C.R. y Norstad, L.I. (2011). *A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program*. Transportation Research Part C Emerging Technologies 19(5). Páginas 896-911 (Agosto 2011) DOI: 10.1016/j.trc.2010.09.006 Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 22-11-2016]

- <https://www.researchgate.net/publication/251630804> *A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program*
296. Rashidi, H. y Tsang, E.P.K. (2013). *Novel constraints satisfaction models for optimization problems in container terminals*. Applied Mathematical Model, vol 37(2013), pp. 3601-3634. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 22-05-2017] <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.042>
 297. Reddaa, Y.; El-Abeda, A.; Regterschot, J. y Scholten W. (2012). *LNG Supply Chain Design and Optimization at Qatargas: A showcase of industry-leading collaboration*. Proceedings of the 2012 World Gas Conference (Kuala Lumpur – Malasia)(2012). Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:pw5uFNxoWmAJ:members.igu.org/old/IGU%2520Events/wgc/wgc-2012/wgc-2012-proceedings/programme-committee-papers/programme-committee-d-pgcd/expert-forum-3.a/lng-supply-chain-design-and-optimization-at-qatargas-a-showcase-of-industry-leading-collaboration/%40%40download/download+&cd=4&hl=es&ct=clnk&gl=es>
 298. Reddy, P.C.P.; Karimi I.A. y Srinivasan, R. (2004a). *A Novel solution approach for optimizing crude oil operations*. Journal of the American Institute of Chemical Engineers (AIChE), vol 50(6): 1177–1197. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: 10.1002/aic.1011
 299. Reddy, P.C.P.; Karimi I.A. y Srinivasan, R. (2004b). *A new continuous-time formulation for scheduling crude oil operations*. Chemical Engineering Science, vol 59(6):1325-1341. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] DOI: 10.1016/j.ces.2004.01.009
 300. Ronen, D. (1986). *Short-Term Scheduling of Vessels for Shipping Bulk or Semi-Bulk Commodities Originating in a Single Area*. Operations Research, 34(1): 164-173. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/opre.34.1.164>
 301. Ronen, D. (2002). *Marine inventory routing: shipments planning*. Journal of the Operational Research Society, vol 53(1): 108–114. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] [doi:10.1057/palgrave.jors.2601264](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601264).
 302. Røsæg, E. (con la colaboración de Hovden, T. y Willumsen, T.) (2009). *A system for queuing in ports*. Universidad de Osla / Scandinavian Institute of Maritime Law Yearbook 2008. (Sjørettsfondet, Boruega) Editado por Pozdnakova. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1697404

-
303. Rother, M., y Shook, J. (1999). *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate MUDA*. The Lean Enterprise Institute, Brookline Mass., (Junio 1999). 102 Páginas. ISBN-10: 0966784308 / ISBN-13: 978-0966784305
304. Roy, D. y Bandyopadhyay, A. (2010). *Cargo unloading problem: a quantitative modelling for arriving at optimum strategy*. International Journal of Modelling in Operations Management 2010; 1: Páginas (125–136). Print ISSN: 2042-4094 Online ISSN: 2042-4108. Disponible bajo petición en [fecha de última consulta el 26-10-2016]
https://www.researchgate.net/publication/264836744_Cargo_unloading_problem_a_quantitative_modelling_for_arriving_at_optimum_strategy
305. Sánchez, C. y Sampedro, M. (1993). Port Simulation Model. Coal Discharge and Delivery for a Thermal Power Plant in Lazaro Cardenas Port, Pacific Coast. The 1993 Pritsker User Conference. Indianapolis, IN, Estados Unidos.
306. Sánchez, C., Uribe, R. y Espinal J.C. (2005). Port simulation model for the discharge and delivery of imported coal for a thermal power plant located in Lazaro Cardenas Port, Mexican Pacific Coast. Proceedings of 2nd International Conference on Maritime Heritage, Spain. <http://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/79/14729>
307. Sayareh, J. y Ahouei, V. R. (2013). *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Reducing the Delays of Cargo Handling Operations in Marine Bulk Terminals*. Journal of Maritime Research 10 (2). (Enero 2013). Páginas 43-50. Disponible bajo petición en [fecha de última consulta el 26-10-2016]
https://www.researchgate.net/publication/269370378_Failure_Mode_and_Effects_Analysis_FMEA_for_Reducing_the_Delays_of_Cargo_Handling_Operations_in_Marine_Bulk_Terminals
308. Schroer, B.J. (20016). *Simulation as a Tool in Understanding the Concepts of Lean Manufacturing*. SIMULATION (20 Octubre 2016) doi: 10.1177/0037549716666682
309. Scholz-Reiter, B.; Windt, K.; Kolditz, J.; Böse, F.; Hildebrandt, T.; Philipp, T. y Höhns, H. (2006). *New Concepts of Modelling and Evaluating Autonomous Logistic Processes*. Manufacturing, Modelling, Management and Control; Elsevier, Oxford (Reino Unido) (Chryssolouris, G. y Mourtzis, D. (eds)) Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017]
<https://pdfs.semanticscholar.org/e755/17fab1ca064c58f02c1dc1449039ec956fa.pdf>

310. Shah, N. (1996). *Mathematical programming techniques for crude oil scheduling*. Computers & Chemical Engineering 20 vol. 20, pp. s1227–s1232, 1996. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/246778113_Mathematical_Programming_Techniques_for_Crude_Oil_Scheduling
311. Sherali, H.D.; Al-Yakoob, S.M. y Hassan, M.M. (1999). *Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem- IIE transactions* 31 (5), 395-406. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [doi:10.1023/A:1007502205917](https://doi.org/10.1023/A:1007502205917)
312. Sherali, H.D. y Al-Yakoob, S.M. (2005). *Determining an optimal fleet mix and schedules. Part I: Single source and destination*. Integer Programming Theory and Practice (editado por John K. Karlof). CRC Press 2005, pp: 137–166. Print ISBN: 978-0-8493-1914-3. eBook ISBN: 978-1-4200-3959-7. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [DOI: 10.1201/9781420039597.ch6](https://doi.org/10.1201/9781420039597.ch6)
313. Sherali, H.D. y Al-Yakoob, S.M. (2005). *Determining an optimal fleet mix and schedules. II: Multiple sources and destinations, and the option of leasing transshipment depots*. Integer Programming Theory and Practice (editado por John K. Karlof). CRC Press 2005, pp: 137–166. Print ISBN: 978-0-8493-1914-3. eBook ISBN: 978-1-4200-3959-7. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [DOI: 10.1201/9781420039597.ch6](https://doi.org/10.1201/9781420039597.ch6)
314. Shih, L.-H. (1997) *Planning of fuel coal imports using a mixed integer programming method*. International Journal of Production Economics 51(3). Páginas 243–249. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/4915725_Planning_of_fuel_coal_imports_using_a_mixed_integer_programming_method.
315. Shingo, S. y Dillon, A.P. (1989): *A Study of the Toyota Production System: From an Industrial Engineering Viewpoint (Produce What Is Needed, When It's Needed)*. Productivity Press, Portland, Ore. (Octubre 1989). 296 Páginas. ISBN-10: 0915299178 / ISBN-13: 978-0915299171
316. Siddiqui, A.W. y Verma, M. (2013). *An Expected Consequence Approach to Route Choice in the Maritime Transportation of Crude Oil*. Risk Analysis vol 33(11). Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] DOI: 10.1111/risa.12049
317. Siddiqui, A.W. y Verma, M. (2015). *A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil*. Transportation Research Part D Transport and Environment 37 (2015): 65-78. DOI: 10.1016/j.trd.2015.04.010. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017]

-
- <https://www.researchgate.net/publication/276413688> A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil.
318. Siemens (2017). *Plant Simulation*. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Plano (Texas, Estados Unidos). Disponible en [fecha de último acceso el 25.05.2017]. www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml
 319. Skipworth, H. y Harrison, A. (2006). *Implications of form postponement to manufacturing a customized product*. International Journal of Production Research, vol 44 (8), 1627–1652. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540500362120>
 320. Slack, B. (1985). *Containerization, inter-port competition, and port selection*. Maritime Policy & Management. vol. 12(4): 293-303. Disponible en [fecha de último acceso el 30.05.2017] DOI: [10.1080/03088838500000043](https://doi.org/10.1080/03088838500000043)
 321. Song, J.-H. y Fuman, K.C. (2013) *A maritime inventory routing problem: Practical approach*. Computers & Operations Research. Volume 40, Issue 3, March 2013, Pages 657–665. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810002625>
 322. Stahlbock, R. y Voß, S. (2008). *Operations research at container terminals: a literature update.*, OR Spectrum, Volumen 30 (número 1). Páginas 1–52. (2008). DOI 10.1007/s00291-007-0100-9. Disponible en [fecha de última consulta el 05.05.2017] <https://www.researchgate.net/publication/225323734> Operations research at container terminals A literature update
 323. Stchedroff, N. y Cheng R.C.H. (2003). *Modelling a continuous process with discrete simulation techniques and its application to LNG Supply chains*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (editado por: S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, y D. J. Morrice) (pp: 1607-1611). Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/14a0/7ef143df827f3ac7435f6cf7eb75704d3479.pdf>
 324. Steenken, D., Voß, S. y Stahlbock, R. (2004). *Container terminal operation and operations research - a classification and literature review*. OR Spectrum, 26 (1) 3–49. (2004). Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <https://www.researchgate.net/publication/225493172> Container terminal operation and operations research - A classification and literature review

-
325. Steer, D.T. y Page A.C.C. (1961), *Feasibility and financial studies of a port installation*. Journal of Operational Research Society 12 (3). Páginas:145–160. Print ISN 0160-5682. DOI: 10.2307/3006772 Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fjors.1961.27>
326. Tang, G.L.; Yu, X.H.; Wang, W.Y.; Guo, Z.J.; Song, X.Q. y Zhang, Y.H. (2015). *Simulation and Modelling of Roll-on/roll-off Terminal Operation*. International Conference of Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2015), vol 1: 748-751. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 27.05.2017] http://www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=22413
327. Tecnomatix (2006). *eM-Plant – eMPower for manufacturing process management*. UGS Corporation. Torrance (California, Estados Unidos). Disponible en [fecha de ultimo acceso el 27.05.2017] https://www.plm.automation.siemens.com/en_gb/Images/fs_tx_eM_plant_tcm642-4943.pdf
328. Tomasgard, A.; Rømo, F.; Fodstad, M. y Midthun, K. (2007). *Optimization Models for the Natural Gas Value Chain*. Capítulo en Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization. Editado por Hasle, G., Lie, K.-A. y Quak, E. Springer Berlin Heidelberg. Páginas: 521-558. Disponible en [fecha de último acceso el 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/226331681_Optimization_Models_for_the_Natural_Gas_Value_Chain
329. TomasWeb (2016): *Tomasweb*. Universidad de Delft (Holanda). Disponible en [fecha de último acceso el 16.11.2016] <http://www.tomasweb.com/>
330. Tompkins, C. (1952). *Discrete Problems and Computers*. INA S3-5, 17 de Noviembre de 1952, pp: 14-16
331. Umang, N.; Bierlaire, M. y Vacca, I. (2011). *The Berth Allocation Problem in bulk terminals*. Swiss Transport Research Conference STRC 2011 (11 de Mayo 2011). Monte Verità (Suiza) Disponible en [fecha de último acceso el 05.12.2016] <http://www.strc.ch/conferences/2011/Umang.pdf>
332. UNCTAD (1973). *Berth Throughput: Systematic Methods for Improving General Cargo Operations*. United Nations Conference on Trade and Development. Secretariat (1973), Naciones Unidas, Génova (Suiza), 193 páginas, pp:18-24.
333. UNCTAD (1976). *Port Performance Indicators*. Report TD/B/C.4/131/Supp.1/rev.1. United Nations Conference on Trade and Development. Secretariat (1976), Naciones Unidas, Génova (Suiza), 27 páginas.

-
- Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/tdbc4d131sup1rev1_en.pdf
334. UNCTAD (1985). *Port Development, A Handbook for Planners in Developing Countries*. United Nations Conference on Trade and Developments. United Nations Conference on Trade and Developments (UNCTAD). TD/BC.4/175/Rev.1. New York. 243 Páginas. ISBN92-1-112160-4
 335. UNCTAD (2015). *Review of Maritime Transport*. UNCTAD/RMT/2015. United Nations Publications. Sales no. E. 15.II.D.6. ISBN 978-92-1-112892-5. eISBN: 978-92-1-057410-5. ISSN 0566-7682. Disponible en [fecha de acceso el 30-11-2016] http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015_en.pdf
 336. USDD (1949). *Procedures for performing a failure mode effect and critical analysis*. United States Department of Defense (9 November 1949). MIL-P-1629. Disponible en [fecha de último acceso 15.05.2017] <https://src.alionscience.com/pdf/MIL-STD-1629RevA.pdf>
 337. Uluscu, O.S.; Ozbas, B.; Altioek, T. y Or, I. (2009). *Risk analysis of the vessel traffic in the strait of Istanbul*. Risk Analysis, vol 29(10): 1454–1472. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] DOI: [10.1111/j.1539-6924.2009.01287.x](https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01287.x)
 338. Vacca, I.; Bierlaire, M. y Salani, M. (2007). *Optimization at container terminals: Status, trends and perspectives*. 7th Swiss Transport Research Conference. Monte Verità, Ascona (Suiza) (12 – 14 Septiembre de 2007) Disponible en [última fecha de consulta el 1410-2016] http://www.strc.ch/conferences/2007/2007_vacca.pdf.
 339. Vacca, I.; Salani, M. y Bierlaire, M. (2010). *Optimization of operations in container terminals: hierarchical vs integrated approaches*. STCR 2010. ECole Polytechnique Federale de Lausanne. Septiembre 2010. 16 Páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 7.11.2016] <http://www.strc.ch/conferences/2010/Vacca.pdf>
 340. Van Asperen, E.; Dekker, R. y Polman, M. (2011). *Priority allocation of ships in a port simulation Eelco*. Proceedings 15th European Simulation Symposium. (Editad por Alexander Verbraeck y Vlatka Hlupic) ISBN 3-936150-28-1 (book) / 3-936150-29-X (CD). Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/229003182_Priority_allocation_of_ships_in_a_port_simulation_Eelco
 341. van Hemert, J. (1984). *Coal Receiving Terminals in Relation to Electricity Generation in Developing Countries*. Article in Natural Resources Forum 8(1):37 - 49 DOI: 10.1111/j.1477-8947.1984.tb00469.x. Disponible en [última fecha de consulta el 1410-

- 2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-8947.1984.tb00469.x/references>
342. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2011): *Dry bulk terminal characteristics*. Working Paper. Disponible en [última fecha de consulta el 1410-2016] www.bulk-solids-handling.com/whitepaper/downloads/17205
343. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2012a): *Modeling the arrival process at dry bulk terminals*. Power Point Presentation. Delft University of Technology - Faculty 3ME, Transport Engineering & Logistics. Disponible en [fecha de último acceso el 01.12.2016] <http://www.exspecta.nl/wp-content/uploads/2015/10/Modeling-arrival-process-at-dry-bulk-terminals.pdf>
344. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2012b): *Stockyard dimensioning for dry bulk terminals*. Working Paper. TRAIL Research School, October 2012 Disponible en [fecha de acceso el 30-11-2016] http://rstrail.nl/new/wp-content/uploads/2014/12/vianen_van_2012.pdf
345. van Vianen, T.A.; Mooijman, D.L.; Ottjes, J.A.; Negenborn, R.R. y G. Lodewijks (2012c): *Simulation based operational control of a dry bulk terminal*. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2012), Pekín, China (April 2012.). Páginas: 73-78. Disponible en [fecha de ultima consulta el 26-10-2016] <http://www.negenborn.net/pubs/2012-icnsc-vianen-et-al-tech.pdf>
346. van Vianen, T. (2014): *Simulation-integrated Design of Dry Bulk Terminals*. Tesis Doctoral. (con la contribución de Lodewijks, G.) Delft University of Technology (Marine & Transport Technology Department - Mechanical, Maritime and Materials Engineering Faculty). TRAIL Thesis Series T2015/1, the Netherlands TRAIL Research School. ISBN: 978-90-5584-182-0 . Copyright © 2015 by Teus van Vianen. 261 Páginas. Disponible en [fecha de ultima consulta el 26-10-2016] http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:d707f257-307a-4fd0-9ee6-160f507a42a8/Simulation-integrated_Design_of_Dry_Bulk_Terminals.pdf
347. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2014a). *Simulation-based rescheduling of the stacker-reclaimer operation*. Journal of Computational Science 10 · June 2014. DOI: 10.1016/j.jocs.2014.06.004. Disponible en [fecha de acceso el 30-11-2016] https://www.researchgate.net/publication/263317677_Simulation-based_rescheduling_of_the_stacker-reclaimer_operation
348. van Vianen, T.A.; Ottjes, J.A. y G. Lodewijks (2014b). *Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals*. Simulation Modelling Practice and Theory Volume 42, March 2014, Pages 119–128. Disponible en [fecha de último acceso

- el 01.12.2016]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X13001901>
349. van Vianen, T.; Ottjes, J. y Lodewijks, G. (2015): *Belt conveyor network design using simulation*. Journal of Simulation 15(3). (Marzo 2015) Páginas 1-9. DOI: 10.1057/jos.2014.38. Disponible en [fecha de última consulta el 26-10-2016] https://www.researchgate.net/publication/273439910_Belt_conveyor_network_design_using_simulation.
350. Vanem, E.; Antao, P.; Ostvik, I. y de Comas, F.D.C. (2008a). *Analysing the risk of LNG carrier operations*. Reliability Engineering and System Safety, Vol 93 (9): 1328–1344. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] DOI: 10.1016/j.res.2007.07.007
351. Vanem, E.; Endresen, O. y Skjong, R. (2008b). *Cost-effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures*. Reliability Engineering & System Safety, vol 93(9): 1354–1368. Disponible en [fecha de último acceso el 15.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.res.2007.07.008>
352. Verschoof, I.J. (2002). *Cranes: Design, Practice, and Maintenance, 2nd Edition*. Universidad de Michigan (Michigan, Estados Unidos). Editado por John Wiley & Sons Inc. ISBN: 978-1-86058-373-5. 328 Páginas.
353. Vieira Jr., V.; Gomez Santos, R.; Souza Costa, T. y Muniz Oliveira A. (2012). *Greedy Heuristic for berth allocation in tidal bulk ports*. Jornada de Informática do Maranhão (JIM 2012) / Escola Regional de Computação dos Estados do Ceará, Maranhão e Piauí (ERCEMAPI 2012). Disponible en [fecha de último acceso el 25-11-2016] https://www.researchgate.net/publication/230813519_Greedy_Heuristic_for_Berth_Allocation_in_Tidal_Bulk_Ports
354. Vis, I. y de Koster, R. (2003). *Transshipment of containers at a container terminal: An overview*. European Journal of Operational Research, vol. 147, pp. 1-16. (2003). Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/222400376_Transshipment_of_containers_at_a_container_terminal_An_overview
355. Wadhwa, L. (1992). *Planning operations of bulk loading terminals by simulation*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers. (ASCE) Volumen 18:3(300). Páginas; 300-315. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-950X%281992%29118%3A3%28300%29>

-
356. Wadhwa, L. (2000). *Optimizing deployment of ship loaders at bulk export terminal*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers. (ASCE) Volumen 126(6). Páginas 297–304 DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:6(297) Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-950X%282000%29126%3A6%28297%29>
357. Wang, X.; Wu, L. y Dong, M. (2011). *Modeling and Accomplishment of Loading-and-Unloading Equipment Optimum Allocation System at Bulk Terminal*. International Journal Computing Network Information Security 2011 (3). Páginas 1–9. Disponible en [fecha de última consulta el 16-11-2016] <http://www.mecs-press.org/ijcnis/ijcnis-v3-n4/IJCNIS-V3-N4-1.pdf>.
358. Wang, W.L.; Liu, S.B.; Lo, S.M. y Gap, L.J. (2014). *Passenger Ship Evacuation Simulation and Validation by Experimental Data Sets*. Procedia Engineering, Vol 71, 2014, pp: 427-432. Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.061>
359. Weeke H.P.M. y Ottjes, J.A. (2000). *Tomas: A tool for object-oriented Modelling and Simulation*. Proceedings of the Advanced Simulation Technology Conference (ASTC 2000) April 19-20, 2000. Washington DC (Estados Unidos). Páginas: 76-81. The Society for Computers Simulation International (SCS). ISBN: 1-56555-199-0 Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] <http://www.tomasweb.com/publications/was0004b.pdf>
360. Weiss, M.; Thomet, M. y Mostoufi, F. (1999). *Interactive simulation model for bulk shipping terminals*. Bulk Solids Handling 19(1): 95–98. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/292662011_Interactive_simulation_model_for_bulk_shipping_terminals
361. Werner, A.; Uggen, K.T.; Fodstad, M., Lium, A.-G. y Egging, R. (2012). *Stochastic Mixed Integer Programming for Integrated Portfolio Planning in the LNG Supply Chain*. The Energy Journal Volumen 35 (Número 1). Enero 2014. Disponible bajo petición en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/268503433_Stochastic_Mixed-Integer_Programming_for_Integrated_Portfolio_Planning_in_the_LNG_Supply_Chain
362. Wikipedia - EVPI (2016). *Expected value of perfect information*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Expected_value_of_perfect_information

-
363. Wikipedia - OBO (2017). *Ore-bulk-oil carrier*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Ore-bulk-oil_carrier
364. Wikipedia - PS (2017). *Plant Simulation*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Plant_Simulation#Historia_de_la_aplicaci.C3.B3n
365. Wikipedia - SBR (2017). *Sistemas Basados en Reglas*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de última consulta el 26.05.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_basado_en_reglas
366. Windt, K.; Böse, F. y Philipp, T. (2008). *Autonomy in Logistics – Identification, Characterisation and Application*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. vol 24(4): 572-578. Disponible en [fecha de último acceso el 28.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.07.008>
367. Woo, S.-H.; Pettit, S.; Beresford, A. y Kwak D.-W. (2012). *Seaport Research: A Decadal Analysis of Trends and Themes Since the 1980s*. Transport Reviews 32(3). pp: 1-27 · May 2012. DOI: 10.1080/01441647.2012.660996. Disponible en [fecha de último acceso el 07.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/254324477_Seaport_Research_A_Decadal_Analysis_of_Trends_and_Themes_Since_the_1980s
368. Wu, L.; Zhang, Y.; Wang, D. y Liu, Z. (2015). *Simulation Study of General Cargo Yard Layout*. Lecture Notes in Electrical Engineering vol 337(1):317-329. Disponible en [fecha de última consulta el 30.05.2017] DOI: [10.1007/978-3-662-46463-2_33](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46463-2_33)
369. Yamada, Y. (2009). *The cost of oil spills from tankers in relation to weight of spilled oil*. Marine technology. SNAME News, vol 46(4): 219–228. Disponible en [fecha de último acceso el 22.04.2017] <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=12f74f0a-ac9f-47a3-babb-fb9a28c81c36>
370. Yaran, A. (2009). *Port area selection for Ro-Ro transportation in Marmara region and an application*. Master's thesis, Istanbul University, Estambul (Turquía).

-
371. Yildirim, S. (2006). Proposing a solution for choosing port layout problem in ro-ro transportation and applying it to İstanbul. Master's thesis Yıldız Technical University, Estambul (Turquía).
372. Yoshida, K.; Murayama, M. e Itakaki, T. (2002). *Study on evaluation of escape route in passenger ships by evacuation simulation and full-scale trials*. Research Institute of Marine Engineering of Japan. Recurso en línea. 12 páginas Disponible en [fecha de último acceso el 29.05.2017] <http://www.rime.jp/paper/interflame.pdf>
373. Young, F.W. (1987). *Multidimensional scaling: History, theory, and applications*. Lawrence Erlbaum Associates. 336 Páginas ISBN 1135059888, 9781135059880.
374. Yudhbir, L. y Iakovou, E. (2001). *A Maritime oil spill risk assessment model*. Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference, pp: 235–240. Disponible en [fecha de último acceso el 01.06.2017] DOI: 10.7901/2169-3358-2001-1-235
375. Zhan, Y.; Zhang, L., Li, W. y Yan, X.(2009a). *Research of Intelligent Decision of Vehicle Slot of Automobile Ro-Ro Terminal Yard*. Journal of Highway and Transportation Research and Development 2009-S1: 23-29. ISSN: 1002-0268. Disponible en [fecha de último acceso el 20.05.2017] http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GLJK2009S1004.htm
376. Zhan, Y.; Zhang, L., Li, W. y Gap. H.-y. (2009b): *Research on the Yard Operation in Automobile Ro-Ro Terminals* Logistics Technology 2009(12): 5-6. Disponible en [fecha de último acceso el 20.05.2017] http://caod.oriprobe.com/articles/17687946/Research_on_the_Yard_Operation_in_Automobile_Ro_Ro_Terminals.htm
377. Zheng, Q.; Rebennack, S.; Iliadis, N. y Pardalos, P. (2010). *Optimization models in the natural gas industry*. Handbook of Power Systems I, Energy Systems, páginas 121-148. Springer Berlin Heidelberg. (Pardalos, P.M.; Rebennack, S.; Pereira M.V.F. e Iliadis, N. (editores)). Disponible en [fecha de último acceso el 15.11.2016] <http://www.rebennack.net/files/papers/ZheRebIliPar10.pdf>

Capítulo 5

Conclusiones, contribuciones de la tesis doctoral y futuras líneas de investigación

5.1 Conclusiones.

De manera simplificada se podría decir que la planificación portuaria comprende la realización de tres tareas diferenciadas: la determinación de la demanda futura, el análisis de la capacidad instalada y la determinación del número óptimo de infraestructuras necesarias para alinear las dos anteriores (demanda y capacidad).

Muchas son las razones que obligan a someter la actividad portuaria a un sistemático y organizado proceso planificador, de entre todas se pueden destacar:

- Fuerte dinamismo de la demanda (tráficos);
- Desigual forma de crecimiento de oferta y demanda;
- Recursos limitados y alto coste de la oferta (infraestructura y/o superestructura portuaria);
- Ciclos de maduración de inversión muy largos;
- Alto grado de irreversibilidad y/o durabilidad de las actuaciones;
- Alta repercusión económica e importancia estratégica del buen funcionamiento de un puerto en el desarrollo de la zona donde está asentado (terminales de carácter público) o para la industria a la que sirve (terminales de carácter privado); y,
- Alta competitividad en la que se mueven los actuales operadores portuarios (tanto en lo que se refiere a otros operadores portuarios como a otros modos de transporte) que obligan a optimizar al máximo posible sus operaciones.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que los recursos, tanto físicos como financieros son limitados por lo que hay que lograr el mejor aprovechamiento posible de ellos, optimizando con ello su gestión.

Las limitaciones físicas son evidentes. Los tramos de costa, estuario o río donde se pueden realizar desarrollos portuarios son escasos tanto por las condiciones que requieren (calado, agitación y accesibilidad terrestre) como por la necesidad de hacerlos compatibles con otros usos o valores (otros usos urbanos, protección ambiental, playas, usos pesqueros y marisqueros y usos lúdicos entre otros), también necesarios en estos tramos del territorio.

Asimismo, son limitados los recursos financieros y las disponibilidades de capital para emprender actuaciones. Por ello cualquier promotor, sea público o privado, debe exigir unos mínimos

umbrales de rentabilidad (financiera en el caso de la inversión privada o al menos económica y social en el caso de inversión pública) que hagan que los recursos que se empleen para este tipo de actividades no son menos rentables o necesarios que en otras alternativas de inversión. De otra forma, los recursos e inversiones públicas, o los capitales e inversiones privadas, debieran migrar hacia estas otras actuaciones con un criterio de racionalidad.

En segundo lugar, es conocido que la demanda y la oferta crecen de una manera desigual, algo común en cualquier actividad económica pero de manera muy acusada en el caso portuario. De manera suficientemente aproximada se puede decir que la demanda portuaria (se asimilará la demanda portuaria con los tráficos movidos por un determinado puerto o terminal) crece o decrece de una manera más o menos continúa en el tiempo, afectada por los ciclos y el crecimiento económico, la evolución industrial y tecnológica, la evolución demográfica, ajustes en la logística y el comercio mundial, aparición de alternativas de transporte a las mercancías movidas a través de sus instalaciones, aparición de tráficos sustitutivos o complementarios, cambios regulatorios, catástrofes naturales, o cualquier otra variable que afecte a la demanda de la mercancía que se mueve por las instalaciones portuarias.

Por el contrario la oferta portuaria (en este caso se asimilará la oferta a la capacidad de las instalaciones) generalmente se mantiene constante o crece³⁴³ de una manera discontinua o a escalones. Efectivamente, de manera general se puede decir que la capacidad u oferta portuaria crece de manera discreta o escalonada de tal manera que cada vez que se construye un nuevo muelle, se dota de nuevos medios de manipulación, se incrementa las superficies de depósito, etc... la capacidad de la instalación se incrementa (si este era el factor limitante o cuello de botella de la capacidad).

Admitiendo este desigual comportamiento de la función de oferta y de demanda parece lógico que la oferta debiera siempre estar en disposición de atender a la demanda potencial por lo que la planificación portuaria debiera ser capaz de detectar cual es la demanda futura y emprender las actuaciones de aumento de la capacidad (incremento de la oferta) necesarios en el momento adecuado (es decir, teniendo en consideración los ciclos de maduración de cada una de las posibles actuaciones de aumento de la capacidad desde su planificación hasta su puesta en

³⁴³ Efectivamente, a no ser que haya una avería de algún elemento, algún colapso de una infraestructura provocada por un accidente, huelgas que limiten los recursos, nuevas normativas que restrinjan los horarios, etc..., la capacidad de una instalación portuaria no decrece.

explotación efectiva) para que siempre dicha curva de oferta - capacidad esté situada por encima de la de demanda - tráfico.

En caso contrario, si la capacidad instalada no permite atender a la demanda de tráfico, se producirán situaciones anómalas en las que dicho tráfico migrará a otro puerto o terminal (concepto que se puede definir como *tráfico desviado*) o a otro modo de transporte (concepto que podría referirse como *modo sustitutivo de transporte*). En cualquier caso, si se producen estos desvíos o sustituciones, se estará introduciendo una disfunción de las cadenas logísticas con incidencia directa en la eficiencia y/o coste del transporte.

Otra de las razones que obligan a realizar un proceso de planificación portuaria es la alta irreversibilidad de las actuaciones o su durabilidad y permanencia en la ocupación del territorio, al menos en lo que se refiere a su componente física.

Efectivamente, el desarrollo de los puertos obliga a la ocupación física de frentes litorales, tramos de estuario o riberas de ríos y, por el propio carácter de las obras de infraestructura que se deben emprender, las mismas permanecerán en el territorio, salvo casos muy excepcionales, con carácter permanente.

Si se considera esto en consonancia con lo dicho anteriormente (limitación de espacios en dichos frentes de actuación y su necesidad de hacerlos compatibles con otros usos y valores) los gestores portuarios deben de una manera responsable tener en cuenta que sus decisiones de incremento de capacidad serán en gran medida irreversibles y, defectos en su planificación, pueden conllevar consecuencias muy negativas para futuras generaciones (máxime si los modelos de crecimiento no son adecuados o si con carácter general se procede a una sobrecapacidad innecesaria).

Si bien la infraestructura permanece presente de manera casi indefinida, se debe añadir en este apartado que una de las labores de la planificación portuaria consiste en la adaptación de usos portuarios desde un punto de vista urbanístico y territorial y que en determinados estados de desarrollo de un puerto y, alcanzados ciertos grados de madurez y/o obsolescencia de sus instalaciones, se deben emprender actuaciones de reordenación e incluso de abandono, refiriéndonos en este caso a procesos de desafectación para uso portuario de determinados espacios y su conversión a otros usos compatibles con el propio modelo de desarrollo de la ciudad en la que se asientan.

Sin entrar en detalle de estos procesos (bien conocidos bajo la definición de actuaciones “*Puerto – Ciudad*” en la comunidad científica y ámbitos portuarios), tan solo cabe señalar como en la mayoría de instalaciones portuarias de cierta edad se han emprendido de manera generalizada actuaciones de recuperación, remodelación o regeneración ambiental en los que se trata de dar

respuesta a esta problemática, transformando los usos de las instalaciones portuarias más antiguas y contiguas con la ciudad en otros mejor adaptados al carácter periurbano de dichas áreas (acompañadas o no de trámites de desafectación y/o entrega de terrenos a otras administraciones) o desarrollando obras de transformación que propicien una recuperación ambiental de zonas portuarias degradadas y adaptándolas a un modelo de desarrollo urbanístico más sostenible.

Se puede afirmar, por tanto, que si bien es cierta la afirmación anterior sobre la irreversibilidad física de las actuaciones, no se puede hacer lo mismo (o al menos con un carácter tan general) en lo que se refiere a la irreversibilidad de usos y compatibilidad con otras actividades.

Otros de los puntos que justifican por sí sola la necesidad de implantar mecanismos de planificación es el fuerte dinamismo de la demanda y la propia competencia inter-portuaria y/o entre modos de transporte. La evolución continua de aspectos como el tamaño de los buques, procesos de concentración de actores (grandes navieras y conferencias marítimas) y procesos de optimización de las cadenas globales de suministro con la aparición de nuevos operadores logísticos que desarrollan nuevas cadenas buscando economías de escala; obligan al gestor portuario a adaptar su oferta a los requerimientos de mercado antes señalado, pues de no hacerlo y sentando como premisa que también existe una fuerte competencia entre diferentes puertos y/o terminales y entre puertos y otros modos de transporte (ferrocarril, carretera y tubería), los usuarios finales del puerto podrán elegir otras opciones que resuelvan sus necesidades logísticas y de transporte de una manera más eficiente y/o a menor coste.

Es por tanto la planificación desde esta perspectiva una condición necesaria para asegurar adecuados niveles de competitividad y productividad en el puerto, debiendo destacar en este apartado la necesidad de que dicha planificación introduzca mecanismos de control, seguimiento y adaptación (flexibilidad) como base de un crecimiento sostenible del propio puerto.

También, se ha señalado al inicio la alta repercusión económica e importancia estratégica del buen funcionamiento de un puerto en el desarrollo de la zona donde está asentado (terminales de carácter público) o para la industria a la que sirve (terminales de carácter privado) como otro de los elementos que justifican la necesidad de ser rigurosos a la hora de planificar cualquier actividad portuaria.

Es bien conocido el impacto que en la economía de la zona de influencia del puerto tiene su buen funcionamiento y cómo puede afectar positiva o negativamente la posición competitiva de las empresas que en éstas se asientan.

Desde esta perspectiva económica y sociopolítica, los gestores portuarios públicos deben asegurar un adecuado desarrollo de infraestructuras y de servicios en los puertos que gestionan, ya que si

bien la presencia de un puerto no es una condición suficiente para un desarrollo económico adecuado (existen otras muchas componentes de competitividad territorial y empresarial) sí que es una condición necesaria en la mayoría de los casos.

Es necesario señalar aquí el bien conocido papel de las infraestructuras en la política económica de un país y como en el caso concreto de las infraestructuras del transporte su ejecución no garantiza la generación de tráfico y movimiento económico asociado pero como su ausencia sí que lo imposibilita.

Si se analiza este punto no desde la perspectiva de lo público sino desde la visión de lo privado, en la mayoría de los casos se encuentra un fenómeno parecido. Se podría citar, por ejemplo, el caso de terminales portuarias dedicadas a una determinada industria (terminales de carga/descarga de metaneros en plantas de licuefacción/regasificación, terminales asociadas a refinerías, terminales de carbón o de minerales, terminales de clinker o fosfatos, etc....).

En todos estos casos, la infraestructura portuaria es accesoria de la actividad principal (por poner un ejemplo una planta de licuefacción de 5 millones de toneladas de capacidad puede tener, actualmente, un coste de entre 3 y 6 billones dólares frente a los escasos 60 / 120 millones de dólares de su terminal de carga o lo que es lo mismo un 2% del total de la inversión), pero, su buen funcionamiento es absolutamente necesaria para la propia actividad productiva.

En este caso y otros similares, las repercusiones económicas que podría introducir un mal funcionamiento de la terminal que obligase a una producción por debajo de los niveles de diseño de dicha industria o incluso a situaciones de colapso logística y pérdida de producción, son de tal magnitud que los parámetros de seguridad que se adoptan en su planificación y diseño (sobredimensionamiento infraestructural y/o de su capacidad) con el consiguiente incremento de sus costes de construcción y/u operación están perfectamente justificados desde una política global de minimización de riesgos³⁴⁴.

³⁴⁴ Claro ejemplo de estas consecuencias se encuentra en la terminal de San Cibrao que da servicio a la empresa Alcoa en el norte de provincia de Lugo (España), donde una parada brusca de producción que afectó a las cubas de electrolisis que precisan de un continuo funcionamiento para evitar la solidificación de sustancias y su inutilización, produjo una avería que llevó a una indemnización de 63 millones de euros (la más cara de la historia del seguro en España en ese momento asumida por la antigua Musini, Sociedad Anónima de Seguros y Reaseguros como aseguradora principal), y que llegó a poner en tela de juicio incluso la viabilidad empresarial de dicha factoría (con activos muy superiores a esta cantidad y principal generadora de empleo en la zona de la maraña lucense). Dicha avería si bien no tuvo relación directa con un mal funcionamiento del puerto se produjo por un accidente marítimo en las costas gallegas (incendio del barco Casón en 1985) que obligó a las autoridades a remolcar y atracar el barco en sus muelles y la alarma social que produjo una deficiente gestión de la emergencia derivó en enfrentamientos del Comité de Empresa de dicha compañía y el abandono masivo del puesto de trabajo de sus empleados (preocupados por posibles riesgos a su seguridad) sin llevar a cabo los procedimientos preestablecidos para la parada de la planta.

Históricamente los procesos de planificación portuaria (en lo que se refiere a la capacidad de las instalaciones) se han basado en técnicas analíticas de tipo determinista muy influenciadas por la teoría de colas.

Estos modelos trataban en síntesis en encontrar un equilibrio óptimo entre la inactividad del usuario del puerto y la inactividad del propio puerto que minimice el coste global del transporte repercutido al usuario final del transporte (quien pagará tanto el coste portuario como el de transporte con los oportunos márgenes). Este enfoque de equilibrio del sistema buque / puerto es tratado con profundidad en el anejo nº1 de la presente tesis.

Alternativamente a los modelos clásicos analíticos se han introducido los procesos de modelización y optimización mediante simulación que permiten un análisis mucho más detallado introduciendo las condiciones particulares de cada inversión y permitiendo un rango más amplio de investigaciones.

Estos métodos, incluidos conceptualmente dentro de las técnicas OR, permiten tomar todo tipo de decisiones: desde las más puramente estratégicas (por ejemplo que inversión realizar), como tácticas (por ejemplo que política de apilado seguir en un parque de contenedores) u operacionales (por ejemplo que medios asignar a una operación concreta); siendo idóneas tanto para estudios de largo plazo (las más estratégicas) como de corto plazo (las más operacionales) o de diferente escala (modelos microscópicos donde se modeliza con alto grado de detalle todos los elementos del sistema *versus* modelos macroscópicos donde la naturaleza del fenómeno sometido a estudio no requiere la modelización individual de todos los elementos del sistema).

La falta de un texto general que, globalmente, tratase la modelización portuaria con técnicas de simulación y optimización, necesidad detectada por el doctorando después de sus más de 20 años de experiencia laboral como gestor de espacios portuarios y consultor de planificación portuaria fueron el germen de la presente tesis y las que impulsaron su redacción.

A continuación se incluyen las conclusiones más relevantes que se han ido destacando en los capítulos nucleares del presente trabajo (es decir obviando el primer capítulo en el que se tratan conceptos básicos y generalidades de simulación sin entrar en el contexto específico de simulación en puertos y terminales).

5.1.1 Conclusiones en cuanto al uso de modelos y simulación en entornos portuarios.

La simulación, tal y como hoy se conoce, nació quizá en el año 1958 de las manos del profesor de investigación operativa de la Universidad de Southampton, Keith Douglas Tocher (1921–1981) con el desarrollo de su GSP (“*General Simulation Program*”).

Después de más de 60 años e impulsada por la computadora primero y el ordenador personal después es una herramienta esencial en muchos campos de actividad, especialmente aquellos procesos industriales donde la OR encuentra un campo preferente de aplicación.

Su extrapolación al campo portuario ha sido sin embargo más lenta que en otros sectores.

Lo ha hecho desde el desarrollo de modelos de propósito especial, específicamente diseñados para la planificación operativa o diseño de instalaciones; siendo el primer modelo el desarrollado por la UNCTAD en el año 1969 (11 años después del primer modelo de Tocher), el segundo, el desarrollado por el Banco Mundial (PORTSIM) en el año 1974 (15 años más tarde) y, el tercero, el MIT Port Simulator desarrollado en 1987 por E.G. Frankel en el *Massachusetts Institute of Technology* (Massachusetts, Estados Unidos).

Desde entonces se ha visto puesto de manifiesto como a finales del siglo XX los modelos de propósito especial pierden interés y se empiezan a desarrollar de una manera increíble diferentes estudios *ad hoc* de modelización en entornos portuarios (fundamentalmente, pero no sólo, en el ámbito de los contenedores).

La realidad es que desde que PORTSIM o el MIT Port Simulator fueron desarrollados (1974 y 1987, respectivamente) estos modelos han evolucionado poco, y en cualquier caso tienen un campo de aplicación ciertamente limitado, configurándose como poco flexibles y no capaces de reproducir en detalle problemas excesivamente complejos como podría ser la modelización de todos los elementos de una terminal (grúas, barcos, elementos de manipulación, medios de transporte, etc.).

Desde entonces, la modelización de entornos portuarios utilizando herramientas de propósito general (lenguajes de simulación, lenguajes de programación o simuladores) no ha dejado de crecer y hoy es un elemento esencial en la toma de decisiones operativas, tácticas y operacionales.

La cantidad, diversidad y complejidad de entornos que pueden simularse es creciente y las restricciones de los modelos iniciales se han ido suprimiendo.

En el siglo XXI, tanto en el campo de la investigación de la operativa portuaria (estudio de operaciones y rendimientos de puertos y terminales) como en el campo práctico del diseño, planificación o evaluación de proyectos de inversión se han extendido la utilización de herramientas genéricas (no específicamente diseñadas para puertos pero capaces de reproducir estos sistemas de una manera más flexible), pero, también han empezado a surgir nuevamente otras de propósito especial como extensiones o bibliotecas especiales de los programas matriz sobre el que se desarrollan.

Efectivamente, como ponen de manifiesto Park *et al.* (2012b) son muchos los lenguajes de programación, lenguajes de simulación y paquetes de simulación o simuladores que han sido utilizados en los últimos años en el campo portuario, citando específicamente estos autores al margen de PORTSIM: Modsim II y III, PCModel, SIMPACK, SIMAN, SIMLIB, SIMPLE++, SLX, SLAM y Visual SLAM, ARENA, AweSim, Witness, Taylor II, GPSS/H, TermSim, Extend-version 3.2.2, HARAP, MUST, Anylogic, Matlab, FORTRAN, Pascal, Visual BASIC, C, C++, Java, etc..

Si bien existen algunas excepciones, sobre todo en la última década, esto ha sido así especialmente en el caso de las terminales de contenedores, donde existen una gran cantidad de agentes que intervienen en la operación susceptibles de ser modelados (barco, grúa de muelle, *stradle carriers*, tractores, *frontlifts*, camiones, ferrocarril,), y donde la productividad cobra quizá un *role* un poco más decisivo que en otro tipo de tráfico por la propia dinámica de la terminal donde la gestión de superficies y el orden de operación en la remoción de los contenedores requieren de un necesario proceso de optimización.

Sin embargo, una de las evidencias que han podido constatarse a lo largo de estos años de trabajo y recopilación es que todavía hoy existe una tremenda desconexión entre agentes, desconexión que se traduce en dos planos y que se ha pretendido solventar con un pequeño grano de arena en esta tesis.

Primero, una desconexión entre el especialista portuario y el especialista programador, que hace que muchas de las referencias bibliográficas que pueden encontrarse parezcan más un laboratorio de algoritmos, paradigmas y procesos de computación en el que simplemente se utiliza un puerto como una plataforma para presentar resultados; que un verdadero esfuerzo de expandir y hacer comprensible los resultados obtenidos a un sector de actividad (el portuario) que nada sabe de abstracciones, algoritmos de enfriamiento lento o paradigmas de simulación.

Como mejor prueba de esta desconexión es que de manera generalizada estos trabajos de simulación portuaria se presentan en foros de investigación operativa, programación o simulación

(como el WSC) o en revistas propias de este sector; y sólo de una manera residual en foros de especialistas en puertos o en las revistas a las que usualmente acceden los profesionales de este área.

Segundo, desconexión entre el mundo científico / académico y el mundo real portuario con tendencia además a la particularización y pocos enfoques más generalistas. Nuevamente gran parte de las referencias bibliográficas que se presentan son de un elevado tono científico – académico y parecen poco determinantes a efectos prácticos y únicamente aplicables a casos experimentales concretos; en muchos casos de poco interés y en la mayoría de ellos nunca extrapolables.

No se ha encontrado una sola referencia bibliográfica global que compile todas estas técnicas, más allá de un capítulo del libro de Frankel (1987) que, obviamente, hoy a quedado totalmente desactualizado después de 30 años desde su publicación.

Esta desconexión y el vacío académico, mi pasión por los puertos y mi testarudez fueron el germen inicial de la tesis.

A partir de ese momento sólo el ejemplo de mis padres, el apoyo de todos los que me han animado (especialmente mi mujer e hijos) y el aliento de mi familia para no ceder en el empeño han conseguido que después de muchos años de esfuerzo (ya he perdido la cuenta de cuantos), hoy de por finalizado un trabajo que me ha sabido a de toda una vida profesional.

5.1.2 Conclusiones en cuanto a entornos de simulación pura en puertos y terminales (paradigmas de simulación: DES, ABS y SD); emulación y modelos físicos.

Desde el punto de vista del paradigma computacional y dentro del sector portuario, los modelos de eventos discretos (DES³⁴⁵) son los primeros que se desarrollaron (cuentan con más de 50 años de recorrido) y de los que más ejemplos se han encontrado en las labores de revisión de literatura científica incluidas en esta tesis doctoral. Efectivamente, el número de artículos y referencias de

³⁴⁵ Acrónimo de *discrete event Simulation*.

modelos basados en agentes (ABS³⁴⁶) y sistemas dinámicos (SD³⁴⁷) es mucho más bajo que las realizadas bajo DES.

Sin embargo, los modelos basados en paradigma ABS y SD en puertos están tomando cierta relevancia desde la década de los 2000 (modelos ABS) y 2010 (modelos SD).

Así, se ha demostrado como los sistemas ABS permiten reproducir fiel y eficazmente el comportamiento dinámico y complejo que se establece en una terminal de contenedores (especialmente en lo que se refiere a la interacción entre grúas y medios de manipulación terrestres) siendo idóneos también para plantear estudios de detalle operativo e incluso sistemas DSS³⁴⁸ implementados en tiempo real.

De igual modo, los SD se revelan como una herramienta útil cuando el enfoque y objetivos son más estratégicos que operativos, cuando el número de variables a considerar es muy alto, sus interdependencias muy complejas o su dinámica de evolución potencialmente alta; condiciones que concurren, por ejemplo, cuando se pretende realizar previsiones a muy largo plazo, en estudios de tipo “macro” o cuando se requiere un gran nivel de abstracción en base más a datos cualitativos que cuantitativos.

Así, los sistemas SD se han exportado con éxito a otras disciplinas portuarias de espectro más amplio como pueden ser las evaluaciones de impacto ambiental; evaluaciones de impacto económico del puerto y sus relaciones con su hinterland; valoración de riesgos y análisis de planes de contingencia; previsiones de tráfico y análisis globales de cadena de suministro, gestión de flota y logística de operaciones marítimo-portuarias.

En base a las referencias publicadas, en los modelos microscópicos las técnicas DES o ABS parecen encontrar un mejor campo de aplicación que los SD (aunque existen realizaciones específicas en esta área bajo este paradigma); siendo en opinión de algunos autores los modelos DES más adecuados que los ABS en modelos integrados que tratan de automatizar la totalidad de los elementos de una terminal.

Esto es así debido al gran número de agentes y multitud de relaciones a tener en cuenta lo que hace que este tipo de modelos encuentren dificultades y restricciones computacionales en técnicas

³⁴⁶ Acrónimo de *agent based simulation*.

³⁴⁷ Acrónimo de *system dynamics*.

³⁴⁸ Acrónimo de *decision support system*.

ABS que son más abordables con los métodos actuales mediante técnicas DES. El avance que en el tiempo de computación se experimenta día a día podría solventar en el futuro esta limitación.

Por el contrario, los modelos ABS han mostrado su potencialidad en la reproducción de la gestión de una terminal de contenedores en lo que se refiere a la gestión del patio y operaciones de transporte horizontal, cuando este enfoque aislado es el que interesa al modelizador.

Su utilización está especialmente descrita cuando se trata de equipar la terminal con AGV's³⁴⁹.

Desde el punto de vista de las herramientas hoy en día existen numerosas plataformas (comerciales o de código abierto) para poder abordar simulaciones en cualquiera de los paradigmas señalados, no existiendo barreras (más allá del coste de uno u otro software) para la implantación de estos sistemas.

Por último, en los últimos años se han introducido en el campo portuario modelos de gestión de terminales a tiempo real (TOS³⁵⁰) que actúan en la “vida real” del puerto (bien configurándose como DSS en los que se apoya el gestor portuario a la hora de tomar sus decisiones; bien como herramienta de control real de las operaciones dando instrucciones directas al equipamiento en el caso de las terminales automatizadas).

Estos TOS se pueden utilizar también en proyectos de emulación en los que el software es real pero la gestión de la terminal es simulada. El objetivo de un ejercicio de emulación es testar cuan adecuado es el TOS antes de su implementación en una terminal real o realizar ajustes o mejoras sobre uno ya existente.

Como campo de reciente aparición en el ámbito de la gestión de operaciones destacan los modelos físicos (*prototyping*), campo en el que se vislumbra en un futuro un alto potencial conforme están avanzando las tecnologías *wireless* y la robótica.

Estos dos últimos aspectos, junto con el coste asociado a este tipo de desarrollos, han introducido una histórica limitación para un mayor desarrollo de este subsector que contrasta con el alto grado de implantación de este tipo de técnicas en el afín campo de la ingeniería portuaria (modelos físicos para el dimensionamiento de infraestructuras portuarias: dique, muelles y configuraciones o *lay-out*).

³⁴⁹ Acrónimo de *automated guided vehicles*.

³⁵⁰ Acrónimo de *terminal operating system*.

5.1.3 Conclusiones en cuanto a modelos de simulación en diferentes clases de terminales dedicadas y terminales multipropósito.

Mientras que muchos son los estudios que se han publicado en el caso de terminales de contenedores, mucho más escasos son estos trabajos en otro tipo de infraestructuras portuarias dedicadas.

Siendo así, las terminales de graneles sólidos y las de graneles líquidos, cuentan con un número apreciable de trabajos. En el primer caso fundamentalmente centrados en los casos de terminales de carbón y mineral de hierro y en el segundo en los tráficos de crudo y sus derivados y GNL.

Sin embargo, los enfoques en estos casos son mucho más limitados en alcance que los que se pueden listar en el caso de contenedores.

En el marco de la presente tesis se han localizado un total de 59 artículos que tratan mediante técnicas de simulación y optimización las terminales de **graneles sólidos** y se ha podido comprobar como el interés de la comunidad científica que resuelve problemas de investigación operativa en este campo de actividad es exponencialmente creciente en el tiempo.

Efectivamente un único artículo corresponde a la década de los 60, dos (2) a la década de los 70 y cinco (5) en la de los 90, mientras que el número casi se duplica en los primeros años 2000 (16 artículos) y cuadriplica en la primera mitad de la presente década (solo en los cinco años contabilizados ya se han localizado 26 artículos científicos).

Analizando los artículos por el tipo de terminal que investigan se ponía de manifiesto que la mayor atención se ha prestado a las terminales de carbón (22 artículos), seguidas de terminales de carbón y mineral de hierro (11 artículos), poliproducción (7 artículos), mineral de hierro (6 artículos) y grano (2 artículos).

En cuanto a las técnicas de simulación se observaba como de una manera abrumadora se han utilizado técnicas de simulación en eventos discretos (DES) y que la simulación se aborda masivamente en terminales mecanizadas mediante cintas.

En el campo de los graneles líquidos, los primeros estudios de modelización en publicarse tuvieron que ver con los tráficos **de crudo de petróleo y otros productos petrolíferos**, y en gran

medida centrados en resolver los problemas de enrutamiento y programación de cargas IRP³⁵¹ y RSP³⁵², procesos de transbordo (o *lightering*) de carga desde grandes buques petroleros a buques más pequeños para hacer una distribución más local y procesos de mezclado (o *blending*) en refinerías tratado conjuntamente con los procesos de programación de cargas y descargas.

En lo que se refiere al estudio de la **cadena de suministro del GNL** este tráfico ha sido introducido en el campo de OR sólo en fechas muy recientes (salvo una excepción los 27 estudios analizados han sido publicados a partir de los años 2000), presentando, por tanto, un potencial de desarrollo futuro muy elevado.

Como pasaría con el caso de terminales y tráfico de crudo y otros productos petrolíferos los estudios en GNL se han centrado monotemáticamente en la resolución de problemas IRP y RSP y sólo en fechas más recientes incorporando el precio del GNL como elemento relevante del modelo en una ampliación de la temática anterior que se ha venido en denominar PISCP³⁵³. Esto sin duda corresponde al mayor peso que en el mercado están tomando las operaciones a corto plazo (*spot*) frente a las compras a largo plazo.

En contraste con las anteriores, las **terminales Ro-Ro** han despertado, hasta la fecha, un escaso interés en la comunidad científica, algo que parece no obedecer a la necesidad de construir nuevas terminales y mejorar las existentes en el contexto de promoción del tráfico marítimo de corta distancia (SSS). Se ha comprobado como los trabajos analizados son escasos y con muy poca diversidad geográfica e involucración de diferentes grupos de investigación.

La práctica totalidad de realizaciones revisadas corresponden al mismo contexto (rampas Ro-Ro en Turquía) y realizadas por el mismo grupo de investigación (Escuela Politécnica de Estambul, Turquía).

Algo parecido a lo que se observa con las terminales Ro-Ro ocurre con las **terminales de vehículos**, donde se encuentran muy pocos estudios y muchos de ellos centrados en China y más en aspectos de infraestructuras que en los propiamente operativos (por el fuerte incremento de las importaciones de vehículos en la década del 2000 a consecuencia de las tasas de crecimiento de este país y la falta de producción nacional propia).

³⁵¹ Acrónimo de *inventory & routing problem*.

³⁵² Acrónimo de *routing & scheduling problem*.

³⁵³ Acrónimo de *pricing, inventory & scheduling combined problem*.

Resulta relevante el caso de las **terminales de ferries y pasajeros (cruceros)**. A pesar de la relevancia de este tipo de terminales, en un caso determinado por la importancia de estas infraestructuras en los sistemas de transporte de las ciudades donde se sitúan y en el segundo por la importancia estratégica, volumen y complejidad de movimientos que requieren las operaciones de embarque y desembarque de cruceristas. El hecho es que no se han encontrado prácticamente estudios que aborden esta temática en el contexto portuario y los ejemplos localizados se refieren únicamente a resolver el problema de evacuación de embarcaciones (no se han localizado ejemplos que estudien la situación de embarque) en el caso de situaciones de emergencia (sólo se ha descubierto una realización en condición de operación normal).

Cerrando este capítulo se puede concluir que los trabajos que se han realizado en el campo de **terminales polivalentes y/o de carga general no contenedorizada** son realmente escasas. Quizá la diversidad de tráfico y dificultad de estandarizar las operaciones dificulta la explotación de un modelo de tipo microscópico en este tipo de infraestructura.

5.2 Contribuciones de la tesis doctoral.

En primer lugar la presente tesis doctoral aporta a la comunidad científica un esquema estructurado y actualizado con el que analizar y clasificar los diferentes modelos portuarios y sus aplicaciones en el análisis de operaciones y formulación de la estrategia empresarial dentro del ámbito de la planificación portuaria. Un estudio exhaustivo que tratase todos los modelos de simulación portuarios desde una perspectiva global y descriptiva no había sido realizado desde Frankel (1985). Obviamente el tiempo transcurrido desde entonces y el avance en las técnicas computacionales y los medios disponibles hacen este estudio muy necesario.

No se está indicando en el párrafo anterior que no existan estudios parciales sobre modelos portuarios abordando problemas específicos (por ejemplo estudios sobre el estado del arte del BAP, QCAP, etc...) o contextos particulares (terminales de contenedores) sino la inexistencia de un estudio que englobe todos ellos en un único texto de tal manera que se permita una visión comparada de los diferentes aspectos de cada uno de los modelos propuestos.

Se analizan todas las herramientas disponibles en la actualidad, bien sea mediante modelos *ad hoc* contruidos sobre lenguajes de programación o lenguajes de simulación, bien modelos contruidos con la ayuda de simuladores; y en uno u otro caso tanto modelos de propósito general (no diseñados específicamente para puertos) como de propósito específico (especializados en este contexto).

A su vez se abordan todos los problemas que pueden resolverse con estas técnicas, proveyendo ejemplos prácticos y bases metodológicas e históricas a través de la revisión de más de un millar de referencias bibliográficas. Esta revisión de la literatura científica publicada sobre el particular, es la más extensa realizada hasta la fecha.

En el capítulo 3 se presenta un análisis de los distintos paradigmas de programación que pueden utilizarse, tanto los más clásicos modelos DES; como los más modernos sistemas ABS o SD enunciados por J.W. Forrester. Se incorpora en este capítulo dos apartados para analizar los estudios que sobre estos dos últimos paradigmas (ABS y SD) se han publicado. Este tipo de clasificación y análisis descriptivo no había sido realizado por ningún autor anteriormente; llegando a conclusiones interesantes sobre el tipo de problemas más idóneos a resolver por cada tipo de paradigma.

Como otro elemento relevante se incorpora un estado del arte y evolución de las experiencias existentes en modelización y optimización de terminales portuarias no contenedorizadas. Como se indica en el capítulo 4, las técnicas de OR están ampliamente implantadas en el caso concreto de las terminales de contenedores y diversos son los autores que han realizado un análisis y clasificación de estas técnicas en estos contextos. Sin embargo, no existen este tipo de estudios recopilatorios en otro tipo de terminales. Los que han sido objeto de análisis ha sido muy variada incluyendo:

- 1) Graneles sólidos;
- 2) Graneles líquidos:
 - i) Crudo de petróleo y otros productos petrolíferos,
 - ii) Gas natural licuado (GNL),
 - iii) Otros graneles líquidos / productos químicos);
- 3) Terminales de carga general y otro tipo de terminales:
 - i) Terminales RO-RO,
 - ii) Terminales de vehículos,
 - iii) Terminales de ferries y pasajeros y, por último,
 - iv) Terminales polivalentes y de carga general no contenedorizada.

En este capítulo se ha podido comprobar como en cada una de las terminales, las aproximaciones a modelización y optimización se ocupan de aquellos aspectos más relevantes en las mismas y que, como norma general no son necesariamente comunes. Así, se puede concluir como en las terminales de graneles líquidos el aspecto más relevante (al menos desde el punto de vista de los estudios publicados) pasaba por la programación de atraques y optimización de rutas de transporte de este tipo de buques; mientras que en las terminales de contenedores este es un tema menos relevante teniendo mucha más importancia la optimización de las operaciones en la propia terminal (asignación de medios de carga y manipulación, optimización del parque de contenedores en la explanada, diseño del óptimo *lay-out*, modelización de los accesos a la terminal, etc.). Por su lado, en las terminales de pasajeros o ferries un aspecto crítico es la evaluación de aspectos de seguridad en la misma.

No deben pasar desapercibidos algunos aspectos relevantes que se incluyen en el anejo nº1 a la tesis. Efectivamente, se incorpora un apéndice a la misma, en el que se analizan los modelos analíticos basados en teoría de colas que han inspirado y en los que se basan gran parte de los modelos computacionales que son objeto del cuerpo de la tesis. Sin esta labor de encuadre colateral quizá sería más complicado entender alguno de los conceptos que se abordan en la misma.

Si bien el objetivo de este anejo es sentar las bases metodológicas y explicar algunos conceptos necesarios para entender el cuerpo de la misma, en esta parte del trabajo se aprovecha para realizar algunas contribuciones que también nos gustaría destacar:

- 1) Es un texto completo en el que se analizan todas las aportaciones de autores en materia de caracterización de distintos sistemas portuarios; indicando para cada tipo de terminal que modelo se puede utilizar. Es decir se analiza para cada tipo de terminal cual es la ley de llegadas (ley de Poisson o parámetro de fase “k” de la función de distribución Erlang) y de servicio (aleatoria o Erlang fase “k”) más apropiada. Ningún autor ha proporcionado una tabla de síntesis como la que se incluye en la tabla 4 de este anejo, existiendo solo estudios parciales sobre algunos contextos particulares (terminales de contenedores por ejemplo). Esta tabla resulta de mucho interés para aplicaciones prácticas en las cuales no existan datos históricos sobre los que el investigador pueda realizar un estudio previo de análisis de sensibilidad a la mejor función de distribución. Este será el caso siempre que se aborden estudios sobre terminales de nueva construcción o en los que se prevea un sustancial cambio de uso.
- 2) Se incluye una descripción completa de todos los casos posibles, tanto aquellos de los que se puede obtener una solución analítica exacta (M/M/n, M/G/1 o G/M/1 en notación Kendall) como aquellos en los que sólo se dispone de soluciones aproximadas (genéricamente

cualquier sistema $E_k/E_k/n$). Se aprovecha además para presentar tablas y gráficas de todos los casos posibles, incluyendo escalas logarítmicas en las representaciones gráficas que facilitan su empleabilidad futura para contextos en los que las tasas de ocupación son bajas. Este tipo de análisis de toda la casuística y la presentación de la formulación bajo gráficas en escala logarítmica no ha sido encontrado en autores anteriores cuando de instalaciones portuarias se trata.

- 3) Se analizan bajo una perspectiva teórica y matemática la influencia que tiene la regularidad de llegadas y de servicios en los parámetros de esperas relativas y con ello en la percepción de la calidad de servicio prestado por el puerto. Si bien es conocido que tanto la regularidad en servicio o llegadas mejora los resultados con respecto a su caso análogo totalmente aleatorio no es tan obvio advertir como comparan los sistemas $M/D/n$ con los $D/M/N$ (es decir uno en el que las llegadas son fijas y el servicio aleatorio, frente a otro con llegadas aleatorias y servicios constantes). De este análisis se concluye como tiene mayor relevancia la programación previa de atraques (llegadas no aleatorias) que la regularidad en el servicio (aleatoriedad en los tiempos dedicados para cargar o descargar los buques), elemento que sin duda puede servir a los gestores portuarios a inclinarse por otros criterios de asignación de atraques frente a los clásicos sistemas FIFO (esquemas de planificación previa con reservas de *slots* o capacidad ya implantados en algunas terminales que prestan servicios a líneas regulares o a tráficoes específicos como el del GNL).
- 4) Se analizan también bajo una perspectiva teórica y matemática la influencia que tiene el número de atraques en los grados de congestión de un puerto y las esperas inducidas a los barcos que en él recalán. Se concluye que, a igualdad de condiciones operativas, un puerto de mayor tamaño (más atraques) puede permitir un mayor grado de ocupación de sus muelles sin aumentar las esperas relativas de los barcos. Esto tiene un importante efecto en términos de competitividad, puesto que se da la paradoja de que un puerto de mayores dimensiones puede ser más productivo (en términos de ocupar más los muelles) que otro más pequeño, resultando sin embargo más atractivo para los usuarios (en razón de unos menores tiempos de espera).
- 5) Se presenta una formulación nueva que permite estimar de una manera muy sencilla las esperas relativas en un sistema $M/D/n$ (sin solución analítica directa) a partir de las esperas relativas del sistema $M/M/n$ (con solución analítica exacta). Dicha fórmula es la siguiente:

$$\eta(M/D/N) / \eta(M/M/N) = 0.4955 * N^{-0.0613}$$

donde “N” es el número de atraques.

Esta relación se estudia para los casos entre 1 y 10 atraques y tasas de ocupación entre el 45% y el 95%³⁵⁴ y se concluye que, dependiendo de la tasa de ocupación y el número de atraques, puede oscilar entre el 50% (1 atraque para cualquier tasa de ocupación) y 58% (10 atraques y tasa de ocupación del 45%). La fórmula aproximada calculada en esta tesis presenta un alto grado de correlación (0,986) lo que permite su utilización con suficiente grado de confort estadístico.

- 6) Se aprovecha para corregir alguna errata e incorporar nuevos casos en las tablas proporcionadas por algunos autores clásicos (Rodríguez, 1985) y que han venido siendo muy utilizadas por los gestores portuarios para resolución de los sistemas $E_k/M/1$.
- 7) Se proporcionan dos ejemplos prácticos de cálculo basado en teoría de colas sobre la base de una terminal de graneles sólidos especializada (con leyes de llegadas y servicio tipo $E_2/E_2/1$) y una terminal polivalente (con leyes $M/E_3/1$) sobre la que se aplican los conceptos descritos con anterioridad de tráfico límite, tráfico de congestión y tráfico de saturación.
- 8) Se expanden hasta fechas recientes el análisis de los modelos que se han denominado de capacidad económica, que se dividen en modelos de primera generación (aquellos que sólo tenían en cuenta los costes del buque y del muelle³⁵⁵) y los de segunda generación³⁵⁶ (aquellos que entran a considerar otros aspectos como los costes de la mercancía, del equipamiento portuario, del personal o de las zonas de depósito). Hasta lo que se ha podido descubrir en el marco de esta tesis doctoral, ningún autor había realizado una clasificación como la que aquí se presenta.

³⁵⁴ Estos intervalos cubren la práctica totalidad de casos de interés ya que es raro encontrar terminales con más de 10 atraques o tiene limitado interés estudiar terminales sub-utilizadas, es decir, con tasas de ocupación inferiores al 45%.

³⁵⁵ Como se veía los más relevantes por orden cronológico serían: Plumlee (1966), Nicolau (1967), Wanhill (1974), Noritake y Kimura (1983), Rodríguez (1985) y Frankel (1987).

³⁵⁶ Los primeros estudios relevantes sobre este particular son los incluidos en Hiang (1990), Huang *et al.* (1995) y Huang y Wu (2005).

5.3 Futuras líneas de investigación

Por último se indica como a lo largo de la tesis, y concretamente en su capítulo 3 y 4, se han propuesto posibles líneas de investigación que inspiren a futuros miembros de la comunidad científica.

Así por ejemplo en el capítulo 3 (apartado 3.6) se tratan los IAV (*Intelligent Autonomous Vehicle*) en contraposición de los AGV's indicando como estos han surgido a partir de la segunda década del siglo XXI y como los primeros se adaptan de manera flexible a cualquier infraestructura (no debe programarse en su sistema de control), tratándose de sistemas autónomos (*versus* automáticos) y sin necesidad de seguir rutas fijas (pues actúan inteligentemente) indicando ya en este epígrafe como estos procesos de automatización se antojan un campo de investigación futuro muy relevante.

Más líneas de investigación se han marcado sin embargo en el capítulo 4. A continuación se resumen englobadas en los distintos tipos de terminales conforme han sido citadas en el dicho apartado:

El primer grupo de terminales analizadas es el de graneles sólidos. Dentro de esta subclase destacan tres posibles áreas de extensión:

- 1) Modelización de un mayor variedad de productos (ya que fundamentalmente los modelos se centran en el caso del tráfico de minerales como el carbón y el mineral de hierro pero ignoran otro tipo de productos algunos con características muy singulares como la bauxita, fosfatos, chatarra, cemento, clinker o grano);
- 2) Modelización de estas terminales utilizando otros paradigmas de simulación (ABS y SD); y,
- 3) Modelización de terminales de graneles dotadas de vehículos de manipulación horizontal en vez de los más habituales sistemas de cintas testados en los modelos desarrollados sobre este tipo de terminales.

Siguiendo con otro tipo de tráfico, como campos de posible futura expansión científica en el caso del GNL³⁵⁷ podrían señalarse siete posibles áreas:

³⁵⁷ Acrónimo de Gas Natural Licuado.

-
- 1) Implantación de otros paradigmas de programación, más allá de la técnicas DES con formulaciones tipo MIP³⁵⁸ o MILP³⁵⁹ que abrumadoramente ocupan el espacio científico dedicado a este tráfico.
 - 2) Introducción de las previsiones meteorológicas como factor adicional en los clásicos IRP cuando se trata de horizontes de corto plazo.
 - 3) Ampliación de los modelos PISCP, incluyendo la influencia en la demanda del GNL la evolución de precios de productos sustitutivos, fundamentalmente el carbón.
 - 4) Combinación mediante simulación de las cadenas logísticas del GNL y del gas por tubería.
 - 5) Análisis de las políticas de respuesta de las compañías frente a ciertos eventos catastróficos o situaciones de emergencia.
 - 6) Evaluación de la respuesta del mercado ante nuevas oportunidades y retos del mercado tales como la ampliación del canal de Panamá, la apertura de nuevas rutas marítimas en latitudes septentrionales, el reajuste de mercado cuando se produzca una masiva expiración de contratos de largo plazo en vigor o la entrada de nuevos volúmenes esperados en el mercado (Estados Unidos, Australia, Irán,...), etc.
 - 7) Incorporación de nuevos nichos de mercado como son los proyectos de pequeña escala (conocidos en este sector como “*LNG small scale*”) o el suministro de GNL como bunker de buques comerciales.

Desde el punto de vista de futuros campos de investigación en el caso de **terminales de crudo de petróleo y productos petrolíferos** se destacaban dos áreas fundamentales:

- 1) Aplicación a estas terminales del problema PISCP (implantado para el caso del GNL), incorporando como un elemento más el precio del crudo en la organización logística de transporte de esta mercancía.
- 2) De igual modo no existen modelos que abarquen específicamente la respuesta de las compañías ante fenómenos extraordinarios como pueden ser bloqueos de puerto o estrechos,

³⁵⁸ Acrónimo de *mixed integer programming*.

³⁵⁹ Acrónimo de *mixed integer linnear programming*.

disrupciones del suministro por parte de algún productor relevante o relajación o incremento de las cuotas de exportación como respuesta de los productores a la volatilidad del mercado.

De manera general, en lo que se refiere a otros tipo de terminales, existe mucho recorrido toda vez que otros entornos portuarios (terminales Ro-Ro, de pasajeros, polivalentes, etc...) están mucho peor tratadas por la comunidad científica.

En lo que se refiere a **tráficos Ro-Ro**, dos serían a nuestro entender los campos preferentes:

- 1) Modelización de líneas regulares servidas por buques Ro-Ro conectando determinados puntos y en los que se comparan los costes y tiempos de servicio entre modos de transporte alternativos (ferrocarril o camión) y el marítimo.
- 2) Análisis y comparación de modos de operación alternativos: uno en el que los buques transportan la carga con su cabeza tractora (viajando el conductor en el buque) y otro en el que únicamente se transportan en el buque los semirremolques contando con diferentes cabezas tractoras y conductores en los puertos de embarque y desembarque. De este modo, los conductores no viajan en el buque y se limitan a realizar la distribución regional de los semirremolques a la llegada del barco a puerto o la concentración de cargas en los puertos de carga.

En lo que se refiere a **terminales de vehículos**:

- 1) Las necesidades de grandes explanadas para el depósito de vehículos y el cambio en la cadena de suministro de este bien (fabricaciones bajo pedido en el que el puerto se configura como el verdadero almacén logístico de los fabricantes antes de la entrega y en el que se minimizan la estancia y movimientos internos de vehículos dentro de la terminal) hacen ver que este tipo de estudios presentan un potencial de futura aplicación, quizá para la adopción de sistemas autónomos (en vez de centralizados) en los que los vehículos toman sus propias decisiones en función de sus propios objetivos.
- 2) En este tipo de terminales todos los estudios que se han localizado se centran en el diseño y evaluación del rendimiento de su elemento crítico (las explanadas) sin ocuparse de otro elemento clave como es la llegada de vehículos o salida de los mismos del puerto por vía terrestre. La modelización de los accesos y terminales ferroviarias asociadas a este tipo de infraestructuras (al modo que se ha hecho en otros contextos como el tráfico de contenedores) puede ser otro potencial campo de trabajo para futuros investigadores.

Parece razonable proponer dos líneas de investigación diferenciadas en el contexto de **terminales de pasajeros**:

-
- 1) Por un lado, expandir los estudios de evacuación de buques (los que masivamente se han desarrollado en este tipo de tráficos) a condiciones de operación normal (no de emergencia) y por otro lado hacerlas expansivas no solo a los procedimientos de desembarque sino al propio embarque.
 - 2) Por otro lado y dado que en determinadas terminales de cruceros el desembarque se produce de manera masiva y los pasajeros acuden a tomar otro modo transporte (taxis o autobuses) para dirigirse a los sitios de visita (produciéndose verdaderas situaciones de congestión de las vías de comunicación terrestre y aparcamientos), se plantea como futura línea de trabajo el modelizar conjuntamente el proceso de desembarque con el de toma de otro modo de terrestre es decir, estudio específico de la interconexión de ambos modos.

En lo que se refiere a **terminales polivalentes y/o de carga general no contenedorizada** se veía como queda un campo de investigación relevante por abordar y que corresponde a introducir un tercer nivel de incertidumbre adicional a la naturaleza estocástica de la llegada de buques y distribución de tiempo de servicios. Aquí, específicamente en este contexto, se debe recordar la propia incertidumbre del lado de la demanda, tanto en volumen total de la misma como en su descomposición o estructura de tráficos.

Anejo 1

Modelos Analíticos basados en Teoría de Colas

1. Introducción

La teoría de colas o QT (de “*Queueing Theory*”) fue enunciada en el año 1908 por Agner Kraup Erlang (Dinamarca, 1878 – 1929) y desarrollada a lo largo de más de 21 años de investigaciones (1908-1929) como aplicación práctica de resolución de problemas de operación en el campo de las telecomunicaciones. Concretamente, este investigador estudiaba como solucionar problemas de congestión en el sistema telefónico de Copenhague (Dinamarca).

Este trabajo fue compilado y traducido al inglés por Brockmeyer *et al.* (1948), y ha sufrido desarrollos en paralelo y posteriores a los del propio A.K.Erlang en infinitud de campos de actividad como los transportes, medicina, producción y organización industrial, telecomunicaciones, ventas en el pequeño y gran comercio, etc. Hoy en día puede considerarse una herramienta esencial en las técnicas de investigación operacional u OR (“*Operational Reserch*”).

La QT es una técnica especialmente aplicable en todos aquellos campos en los que el nivel de servicio y el número clientes que requieren ser atendidos son variables críticas para el diseño de las capacidades. Siendo así, el análisis de las esperas que han de soportar los clientes y el grado de congestión que soporta el sistema son los aspectos más relevantes en la percepción que del servicio tienen dichos clientes y de la propia productividad del sistema frente a otros alternativos, sustitutivos o en competencia.

Para dar respuesta a un óptimo dimensionamiento del sistema, la QT permite dimensionar el número de unidades que prestan el servicio (“servidores” en lenguaje QT) para que las esperas que han de soportar los clientes estén dentro de unos parámetros admisibles.

En sus primeras aplicaciones en el caso portuario, la importación de estas técnicas pasaba por considerar los buques que llegaban a un puerto como el cliente o demandante del servicio. En el caso de que hubiera atraque libre procedían a ocuparlo y si no quedaban fondeados a la espera.

En este caso, el tiempo de servicio es la suma del tiempo que un buque permanece en cola a la espera de atraque y del tiempo que el buque permanece en operación.

El tiempo de operación sería el intervalo que transcurre entre las maniobras de atraque, carga o descarga del buque y desatraque del mismo; contando todos los tiempos muertos de este proceso (productivos o improductivos). Dicho de otra forma, el tiempo de operación es aquel que transcurre desde que el barco recibe la instrucción de proceder al atraque hasta que deja este libre y puede ser ocupado por otro.

Por su lado el número de servidores del sistema es el número de atraques disponibles.

Si bien este tipo de aplicación práctica de la QT fue la exportada a los puertos, con el transcurso del tiempo nuevos sistemas de colas se fueron definiendo y numerosos autores los han estudiado y modelizado. Por citar algunos ejemplos, los medios de manipulación terrestres sirviendo a una o varias grúas de muelle o las colas de camiones que se forman a las entradas de los terminales conforman otros sistemas que también puede abordarse con técnicas QT.

Antes de proceder a presentar la aplicación portuaria de la QT es necesario repasar unas nociones básicas de esta teoría, sin necesidad de entrar en complejos desarrollos matemáticos de su definición y posterior resolución para los que se relacionan las oportunas referencias bibliográficas.

En este anejo y en aras de una simplicidad explicativa se abordará sólo el primero de los casos (sistema buque-muelle) ya que otros sistemas (grúa-medios de manipulación por ejemplo) han sido abordados cuando así ha parecido relevante en el cuerpo de esta tesis a lo largo de diferentes capítulos y desde el punto de vista conceptual se puede asimilar unos a otros para hacer frente a su análisis desde un enfoque teórico como el que se pretende en este anejo complementario.

2. Principios básicos y metodológicos de la teoría de colas

Este anejo se centrará, por lo tanto, en describir con más detalle sólo aquellos aspectos que encuentran una aplicación real práctica en la gestión portuaria.

Para definir y poder encontrar soluciones (teóricas o prácticas) a un problema genérico QT es necesario:

- Conocer o definir una ley de distribución de llegada de clientes que solicitan el servicio. En nuestro caso sería la ley de llegada de buques a puerto usualmente referenciado como tiempo entre llegada de buques en literatura científica.
- Conocer o definir una ley de distribución de tiempos de servicio. En nuestro caso distribución de tiempos de operación de buques.
- Definir el número de servidores. En nuestro caso el número de puestos de atraques.
- Definir la disciplina de cola u orden de atención; es decir cuál es el criterio de asignación por el cual se selecciona que un cliente en la cola de espera pase a ser atendido. En nuestro caso sería el criterio de asignación de atraques.

- Definir el diseño de servidores y/o el número de colas. Efectivamente, no es lo mismo tener una única cola para varios servidores en paralelo que varias colas atendidas por varios servidores. En el caso portuario se define usualmente una única cola para cada conjunto de puestos de atraques homogéneos, separando funcionalmente los diferentes sistemas en los que un conjunto de buques acceden a un tipo de atraques. Dicho de otra forma, se definirán unidades de explotación y habrá diferentes colas (pero únicas) para el conjunto de barcos que acuden a un conjunto de atraques específicos.
- Definir el tamaño de la población susceptible de solicitar el servicio. En efecto, las soluciones matemáticas varían en el caso de que la población que requiere el servicio sea infinita o cuasi-infinita o tenga un tamaño limitado. En el caso portuario usualmente y como simplificación se adopta un sistema de población infinita compuesta por un número tan grande de buques que no restringen la ley de llegadas a puerto.
- Definir la capacidad del sistema o tamaño máximo de unidades que se pueden atender tanto en servicio como en cola. En el caso portuario, y como simplificación, se acepta que la capacidad del sistema es infinita o lo que es lo mismo el fondeadero no presenta restricciones y cualquier barco que llegue y no pueda ser atendido puede proceder a fondear a la espera. Si bien esta simplificación no es aplicable desde el punto de vista físico (por la propia limitación del fondeadero donde caben un número máximo de barcos) sí puede ser adoptado desde el punto de vista operativo. En el caso de que el fondeadero esté totalmente ocupado se asume que el barco queda en navegación hasta que puede proceder al atraque o al fondeo.

En el caso de leyes de distribución (tanto de llegadas como de servicio), Erlang definió un estadístico³⁶⁰, como una distribución de probabilidad continua con dos parámetros k (parámetro de forma) y λ cuya función de densidad para valores $x > 0$ es:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!} \text{ para } x, \lambda \geq 0 \quad (1)$$

Y una función de distribución que corresponde a la ecuación:

$$f(x) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^n}{n!} \quad (2)$$

Dicho estadístico es un caso particular de la distribución Gamma³⁶¹, distribución de probabilidad continua con dos parámetros k y λ cuya función de densidad para valores $x > 0$ es

³⁶⁰ Dicho estadístico es usualmente conocido como función de distribución Erlang.

³⁶¹ La función Erlang es un caso particular de la función $\Gamma(k)$ donde k es un número entero y satisface la relación $\Gamma(k) = (k-1)!$.

$$f(x, \lambda) = \lambda \cdot e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(k)} \text{ para } x, \lambda \geq 0 \quad (3)$$

En la función de probabilidad Erlang se cumple que su esperanza viene dada por la expresión:

$$E(x) = \mu = k / \lambda \quad (4)$$

y su varianza por la fórmula:

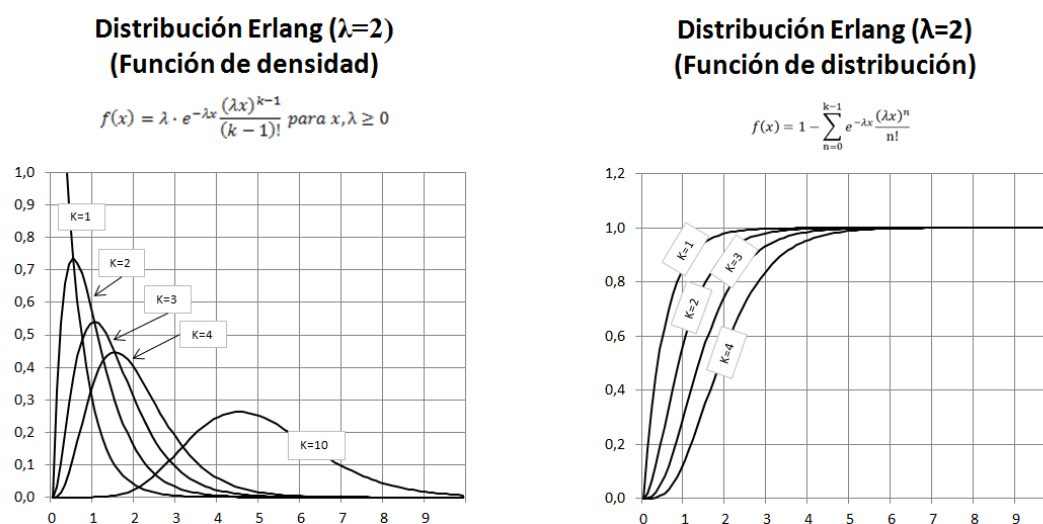
$$V(x) = \sigma^2 = k / \lambda^2 \quad (5)$$

Mientras que la función generadora de momentos responde a la expresión:

$$f(t) = (1-t/\lambda)^{-k} \text{ para } t < \lambda \quad (6)$$

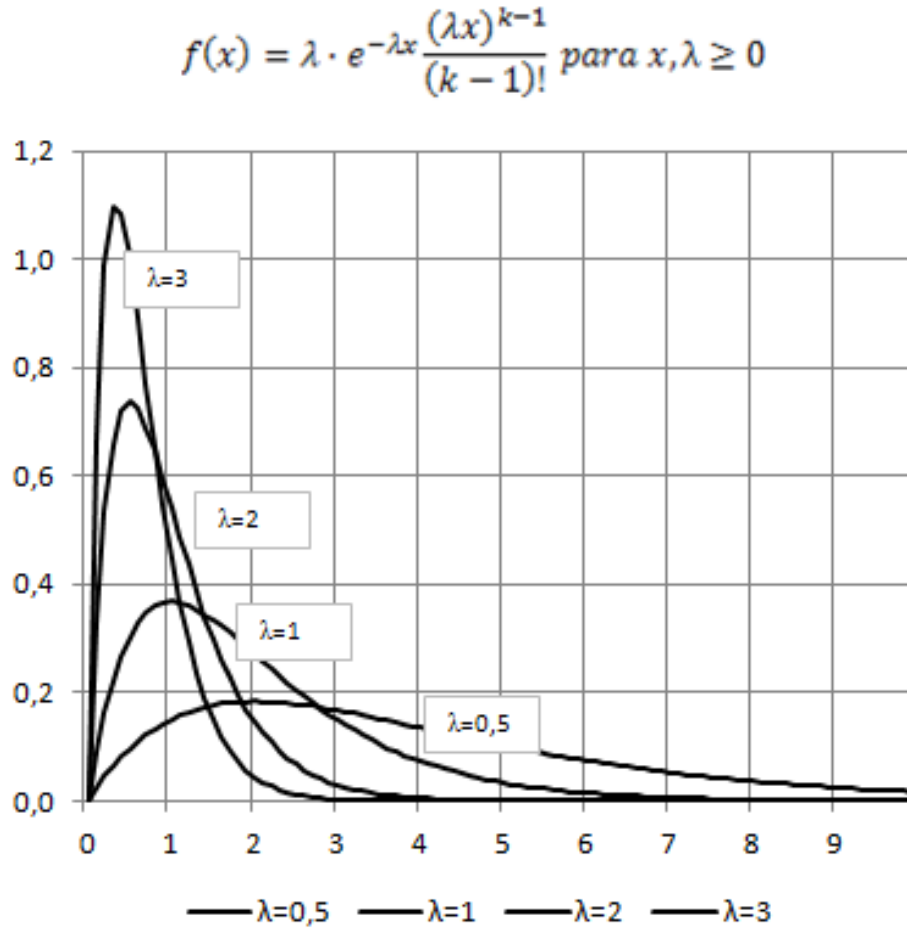
En la Ilustración 279 se observa tanto la función de densidad como la distribución para el caso particular de $\lambda = 2$. Se observa como a medida que se aumenta el parámetro “ k ” de la función Erlang (al parámetro “ k ” se denomina indistintamente “orden”, “forma” o “fase”) desde $k = 1$ hasta $k = 10$ la curva evoluciona desde una exponencial pura ($k=1$) hacia curvas con un máximo cada vez menor y cada vez más desplazado en el eje de abscisas lo que demuestra gráficamente que a mayor orden de k se incrementa su media y su varianza tal y como se ha puesto de manifiesto en las ecuaciones anteriores (4) y (5).

Ilustración 279. Funciones de distribución y densidad Erlang (E_k) con $\lambda=2$.



Fuente: Elaboración propia.

Para poder observar cómo afecta el parámetro λ , se podría construir una nueva gráfica con “ k ” fija y forzar variaciones de este parámetro (véase como ejemplo la ilustración 280 donde se presenta la función de distribución con $k=2$). En este caso se observa cómo se produce el efecto contrario: a igualdad de forma “ k ” la media decrece y la varianza crece con el parámetro λ , también congruente con las expresiones matemáticas arriba enunciadas.

Ilustración 280. Función de distribución Erlang de parámetro de forma 2 (E_2) y variaciones de λ .

Fuente: Elaboración propia.

Si se considera la variable “x” de las funciones anteriores como el tiempo, dicha ecuación de Erlang establece que la probabilidad (“ P_0 ”) de que el tiempo de servicio exceda el tiempo “t” (siendo “ $1/\mu$ ” el tiempo medio de servicio) se representa mediante:

$$P_0(t) = e^{-K\mu t} \sum_{n=0}^{K-1} (K\mu t)^n / n! \quad (7)$$

En el caso más simple, para $k=1$ coincide con la distribución exponencial.

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x} \quad (8)$$

y sus parámetros característicos son los ya conocidos:

$$E(x) = \mu = 1 / \lambda \quad (9)$$

$$V(x) = \sigma^2 = 1 / \lambda^2 \quad (10)$$

Con la función generadora de momentos:

$$F(t) = 1 / (1 - t/\lambda) \quad (11)$$

Dicha ecuación de Erlang establece que la probabilidad (“ P_0 ”) de que el tiempo de servicio exceda el tiempo “ t ” es:

$$P_0(t) = e^{-\mu t} \quad (12)$$

Dichas funciones, tanto la exponencial (que se denomina genéricamente “M” como acrónimo de función markoviana descriptor de un proceso puramente aleatorio de tipo Poisson con este tipo de comportamiento exponencial o parámetro de forma igual a uno) como las de Erlang de orden “ k ” (que se denominará genéricamente E_k) han sido ampliamente estudiadas, contrastando su aplicabilidad y ajuste a modelos portuarios con datos muestrales reales (observados) tanto para la distribución de llegadas de buques a puerto (distribución de tiempos entre llegadas) como de distribución de tiempos de servicio de buques en atraque.

Al margen de éstas, en algunos casos, otras funciones de distribución (tanto en llegadas como en servicio) han sido estudiadas en la literatura científica, citando como ejemplo las funciones deterministas o funciones constantes (que suelen describirse con la letra “D”), en las que la ley de llegadas (o las de servicio) son en realidad un fenómeno constante (a tiempos fijos). Algunos autores han estudiado otras funciones generales o binomiales (que se representan de manera genérica como “G”), distribuciones de tipo normal, Gumbel, etc. para según qué caso práctico.

Como se expone a continuación las funciones deterministas corresponden en realidad a una distribución Erlang de orden ∞ .

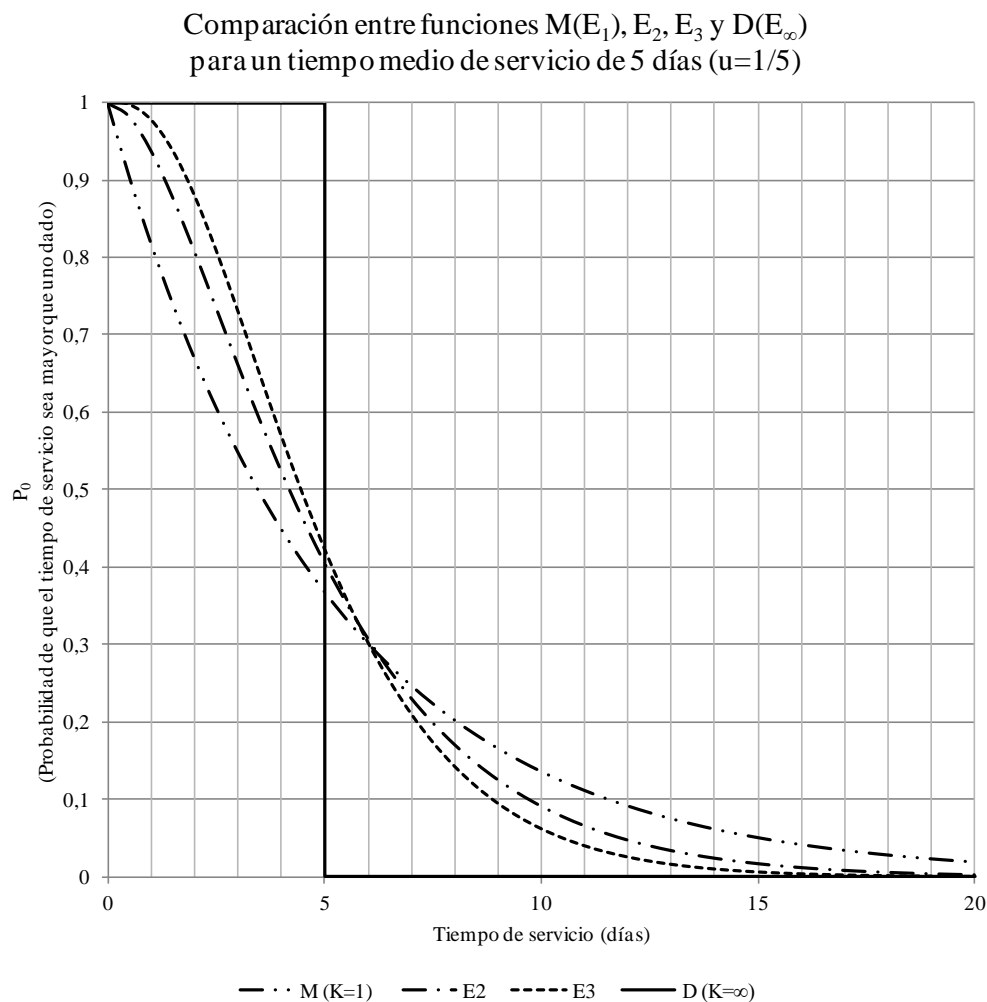
Efectivamente, en la ilustración 281 se observa cómo va evolucionando la probabilidad (P_0) de que el tiempo de servicio (o tiempo de llegada) exceda de un determinado tiempo “ t ” en función del factor k . De igual modo se pone de manifiesto como en las distribuciones de orden “ k ” van aproximándose del caso $k = 1$ (exponencial) al caso $k = \infty$ (determinista), en el que el tiempo de servicio (o tiempo de llegada) es una constante.

Para comprender visualmente el funcionamiento de estas funciones se representa en la ilustración 281 un caso particular para tiempos medios de servicio de 5 días (“ $\mu=1/5$ ”) que correspondería a la expresión:

$$P_0(t) = e^{-Kt/5} \sum_{n=0}^{n=K-1} (Kt/5)^n / n! \quad (7.b)$$

Se observa en dicha gráfica como como para el caso de función determinista (constante) la probabilidad P_0 es igual a uno (1) siempre que el tiempo sea menor al tiempo medio de servicio (5 días) y es cero (0) para cualquier tiempo mayor que éste.

Ilustración 281. Comparación entre funciones $M(E_1)$, E_2 , E_3 y $D(E_\infty)$ para un tiempo medio de servicio de 5 días.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la disciplina de cola varios son los sistemas utilizados:

- *First Come First Served* (FCFS) o *First In First Out* (FIFO); es decir, el primero que llegó a la cola es el primero que se atenderá en el momento que quede un puesto libre.
- *Last Come First Served* (LCFS) o *Last In First Out* (LIFO); que sería el caso contrario al anterior en el que el último en llegar es el primero en ser atendido.
- Asignación aleatoria o SIRO (del acrónimo inglés “*Service In Random Order*”); en el que se selecciona el cliente que saldrá de la cola para ser servido mediante un puro proceso aleatorio.

- Asignación de prioridades o PS (del acrónimo “*Processor Sharing*”); en el que existe alguna regla para asignación de que cliente es atendido (prioridad).
- Otros (algunos autores utilizan criterios muy variados como asignar atraque a aquellos barcos cuya operación es más rápida, a los que transportan productos perecederos o pasajeros, a los que sirven líneas regulares, etc...).

El de mayor aplicación en ambientes portuarios, es el sistema FIFO que implícitamente lleva a un mecanismo de asignación de atraques por orden de llegadas bastante extendido en los diferentes reglamentos de utilización de los puertos a nivel mundial.

Es importante señalar que este sistema puede encontrar excepciones como aquellas terminales en las que se establecen mecanismos de programación periódica (anual, trimestral, mensual o diaria) y asignación de ventanas temporales de entrada a determinados usuarios (“*slots*”).

Dichos usuarios “contratan” una ventana de entrada (reserva de capacidad) para optimizar su logística marítima y, por tanto, tienen preferencia a la entrada dentro de su ventana. En el caso de que llegara otro buque en esta ventana el primero tendría preferencia para ocupar temporalmente el tiempo de servicio pre-asignado para éste barco. En el caso de que el buque perdiera por retraso la venta acordada pasaría a formar parte de una cola secuencial a la espera de contar con espacio libre (no pre-asignado a otro usuario).

Este sistema se da, por ejemplo, en terminales con servicios regulares de contenedores o RO-RO, terminales de graneles líquidos multicliente como las terminales de GNL, etc. Como se explica más adelante existen ciertos aspectos imprevisibles que hacen que, aún en este caso, no se pueda hablar de funciones constantes “puras”. Efectivamente, en base a datos reales observados en terminales con comportamiento teóricamente constante muchos autores han propuesto como mejor aproximación diversas funciones Erlang de distinto orden k .

Por tanto, desde el punto de vista práctico existen una multitud de casos diferentes en QT (con tratamiento y resolución matemática muy distintas) como combinación de los parámetros anteriores (diferentes leyes de distribución, tamaños de población, leyes o reglas de asignación, etc...).

Para normalizar su definición y facilitar la divulgación científica de resultados, Kendall (1948, 1951 y 1953) desarrolló una notación basada en un descriptor bajo la forma $[1/2/3]$, más tarde extendida a la forma $[1/2/3][4/5/6]$ donde:

[1] Es el código que describe el proceso de llegada. Los códigos usados son:

- **M** para “*Markoviano*” cuando la distribución de llegadas se comporta como un fenómeno aleatorio tipo *Poisson* (distribución exponencial con $k=1$);

- E_k para los tiempos entre llegadas que siguen funciones Erlang con parámetro forma “ k ”;
 - D para unos tiempos entre llegadas "determinísticas" (ley de llegadas constantes), también a veces referidas simplemente como E_∞ ;
 - G para una "distribución general" de los tiempos entre llegadas (cualquiera definida por el usuario en función de las características del sistema).
- [2] Un código similar que representa el proceso de servicio (tiempo de servicio). Se usan los mismos símbolos que anteriormente: M para exponencial, E_k para las leyes de servicio Erlang de forma “ k ”, D para deterministas y G para cualquier otra distribución).
- [3] El número de canales de servicio (o servidores). En nuestro caso número de atraques.
- [4] La capacidad del sistema, o el número máximo de clientes permitidos en el sistema (incluyendo todos los de la cola y los que se encuentran en atendidos o en servicio). Cuando el número está al máximo (en nuestro caso por ejemplo en el caso de que el fondeadero estuviese lleno de barcos y los buques fuesen obligados a desviarse a otros sistemas), las siguientes entradas son rechazadas³⁶². En el caso de que la capacidad máxima del sistema sea “ K ” se utiliza esta letra o en el caso de que la capacidad sea ilimitada se utiliza “ ∞ ”.
- [5] El orden de prioridad en la que los trabajos en la cola son servidos: Usualmente se utilizan los siguientes criterios de asignación:
- FCFS (First Come First Served) o FIFO (First In First Out);
 - LCFS (Last Come First Served) o LIFO (Last In First Out);
 - SIRO (Service In Random Order);
 - PS (asignación de prioridades o “*Processor Sharing*”).
- [6] El tamaño de la población desde donde los clientes pueden acudir potencialmente a requerir el servicio (en función de ésta la tasa de llegadas puede ser limitada). La

³⁶² Un caso particular de esta situación es el modelo $M/M/n/n$ o **Erlang-B**, en el cual no hay cola de espera, sino “ n ” recursos (servidores) y hasta “ n ” usuarios como máximo; si llega el usuario $n+1$, es rechazado. Este último modelo es el que se aplica en telefonía convencional. Otro caso particular es el modelo **Erlang-C** o $M/M/n$, donde la capacidad del sistema es ilimitada, aunque haya sólo “ n ” recursos; en caso de llegar el recurso número $n+1$, pasará a una cola de espera, pero no es rechazado.

población puede ser finita (denominándola “K” y siendo “K” el tamaño de la población) o infinita (en este caso se utilizaría nomenclatura “ ∞ ”).

En los casos más habituales en los que el tamaño del sistema es ilimitado ($[4]=\infty$), el proceso de asignación es el habitual de primero en llegar es el primero en ser atendido ($[5]=\text{FIFO}$) y tamaño de la población infinita ($[6]=\infty$); se prescinde de estos tres últimos códigos y se habla directamente de sistemas $[1]/[2]/[3]$ como simplificación de sistemas $[1]/[2]/[3]/\infty/\text{FIFO}/\infty$.

Estas simplificaciones son generalmente admitidas en ambientes portuarios en tanto que:

- El fondeadero se entiende que tiene capacidad de atender infinitos barcos (o de no ser así los barcos permanecen navegando hasta que se les da orden de entrada); por lo que la capacidad del sistema es ilimitada.
- La regla de entrada a puerto es efectivamente una regla FIFO (excepción hecha de las que ya se han comentado y que de no ser expresamente mencionada no se aplicará en los desarrollos matemáticos posteriores).
- El número de clientes (barcos) es cuasi-infinito en comparación con el número de atraques disponibles en un puerto; puesto que, en principio, al atraque podría acudir cualquier barco de la flota mundial sin restricciones.

No es objeto de este apéndice de la tesis realizar un análisis matemático detallado de la QT, y de cómo diferentes autores han desarrollado soluciones (exactas o aproximadas) a cada una de las formulaciones matemáticas a los sistemas $[1/2/3]$, pero se incluye a continuación la tabla 32 donde se citan los diferentes autores y los tipos de problemas que han abordado.

Tabla 32. Analisis de la literatura en relación a la QT. Soluciones propuestas a diferentes sistemas.

Autor	Sistema	Referencia Bibliográfica
E.N. Erlang	M/M/s M/D/s M/E _k /1	Brockmeyer <i>et al.</i> (1948)
G.P. Cosmetatos T. Kinura	M/D/s	Cosmetatos (1975) Kimura (1991)
G.P. Cosmetatos	D/M/s	Cosmetatos (1975)
F. Pollaczek	E _k /G/1	Pollazzek (1930a y 1930b)
A. Khintchine	M/G/1	Khintchine (1932)
F. Pollaczek G.P. Cosmetatos	M/G/s	Pollazzek (1934) Cosmetatos (1976)
D. Volberg	E _k /G/1	Volberg (1939)
D.G. Kendall	M/G/1	Kendall (1951)
D.V. Lindley	G/G/1	Lindley (1952)
F. Pollaczek	G/G/1	Pollazzek (1952)
W.L. Smith	G/G/1	Smith (1953)
D. G. Kendall	G/M/s	Kendall (1953)

Fuente: Elaboración Propia

3. Definiciones y relaciones estadísticas básicas.

Se definen a continuación algunas variables y/o indicadores de rendimiento que se utilizarán más tarde en el caso de la aplicación práctica a planificación portuaria:

- Frecuencia de llegada (“ λ ”): o número medio de buques que entran en el sistema por unidad de tiempo (medido en buques/día, buques/hora...).
- Intensidad o nivel de servicio (“ μ ”): número medio de buques que pueden ser atendidos por unidad de tiempo en el caso de que los muelles estuviesen permanente ocupados (buques/día, buques/hora,...). Su inversa es el tiempo medio que está ocupado cada atraque ($=1/\mu$).
- Tasa de ocupación o densidad de tráfico (“ α ”) que es el porcentaje de tiempo que los muelles permanecen ocupados (o fracción del tiempo que cada muelle está ocupado), expresado en %.
- Número de atraques (“ N ”) expresado por un número entero mayor que uno.

- Tiempo medio de servicio (“ W_s ”): tiempo promedio (días, horas,...) que transcurre entre dos maniobras sucesivas y sin interrupción y que incluye tanto el tiempo de operación (carga y descarga), como el tiempo de maniobra (atraque y desatraque) y el tiempo de inactividad (autorizaciones aduaneras, apertura de escotillas, traslado de grúas,...).
- Espera o tiempo medio de buque en cola (“ W_q ”) que es el tiempo medio (días, horas,...) que un buque permanece a la espera de poder ser atendido por no disponer de puesto libre de atraque.
- Tiempo medio del barco en el sistema (“ W ”) como suma del tiempo medio de un barco en cola (“ W_q ”) y el tiempo que tarda en media en ser servido un buque (“ W_s ”).

La relación entre las variables anteriores es:

- El nivel de servicio (“ μ ”) es a su vez el cociente entre el número de atraques (“ N ”) y el tiempo de servicio (“ W_s ”), es decir:

$$\mu = N / W_s \quad (13)$$

- La tasa de ocupación (“ α ”) es el cociente entre la frecuencia de llegada (“ λ ”) y la intensidad de servicio (“ μ ”), es decir:

$$\alpha = \lambda / \mu \quad (14)$$

Este parámetro es muy importante ya que como se verá muchas soluciones se expresarán de una manera muy sencilla en función de “ α ” y de una manera muy intuitiva define el nivel de servicio percibido por los usuarios del puerto (percepción por el usuario del tiempo que los muelles están ocupados/libres y por tanto probabilidad que tenga de ser atendido o de esperar).

Con este parámetro se pueden, además, definir nuevos conceptos que serán de utilidad para el desarrollo matemático posterior y comprensión práctica del modelo como son:

- Espera relativa (“ η ”) que es el cociente entre el tiempo medio de espera o tiempo medio que permanecen los barcos en la cola (“ W_q ”) y el tiempo medio de servicio (“ W_s ”) y que es un buen indicador a su vez del nivel de servicio (cuanto más tiempo en espera sufra un buque en relación al tiempo de servicio peor será el servicio percibido por dicho buque:

$$\eta = W_q / W_s = \mu * W_q / N \quad (15)$$

- Longitud del servicio o número medio de buques atracados o servidos (o de atraques ocupados), (“ L_s ”) que obviamente depende de la tasa de ocupación (“ α ”) y del número de atraques (“ N ”) a través de la ecuación (14) y con ello de la frecuencia de llegada (“ λ ”) y el tiempo medio de servicio (“ W_s ”) con nada más que sustituir expresiones anteriores:

$$L_s = \alpha * N = \lambda * N / \mu = \lambda * W_s \quad (16)$$

- Longitud medio de la cola de espera (“ L_q ”), o número medio que los buques que permanecen en espera antes de disponer de atraque, que depende de la frecuencia de llegada (“ λ ”) y el tiempo medio de espera (“ W_q ”) a través de la relación ($L_q = \lambda * W_q$) y con ello también de la tasa de ocupación (“ α ”), número de atraques (“ N ”) y espera relativa (“ η ”) sustituyendo de igual modo ecuaciones anteriores (14) y (15):

$$L_q = \lambda * W_q = \mu * \alpha * W_q = \eta * \alpha * N \quad (17)$$

- Tiempo medio de estancia (“ W ”) como suma del tiempo de servicio (“ W_s ”) y tiempo de espera (“ W_q ”) y en función de las relaciones anteriores (ecuaciones (16) y (17)) es también función del número de atraques (“ N ”), la intensidad de servicio (“ μ ”) y la espera relativa (“ η ”) mediante la expresión:

$$W = W_s + W_q = W_s + \eta * W_s = W_s * (1 + \eta) = N / \mu * (1 + \eta) \quad (18)$$

- Longitud del servicio o número medio de buques en puerto (atracaos o en espera) (“ L ”) que será la suma de L_q (número medio de barcos en cola) y L_s (número medio de barcos atendidos o en atraque) y que dependerá de la frecuencia de llegada (“ λ ”) y el tiempo medio de estancia en puerto (“ W ”) y despejando de fórmulas anteriores ($\alpha = L_s / N \rightarrow L_s = \alpha * N$) y ($L_q = \eta * \alpha * N$); del número de atraques (“ N ”), tasa de ocupación (“ α ”) y espera relativa (“ η ”); o mediante la expresión anterior ($W = N / \mu * (1 + \eta)$) del factor “ λ ” y del tiempo medio de estancia en puerto “ W ”:

$$L = L_q + L_s = \eta * \alpha * N + \alpha * N = N * \alpha * (1 + \eta) = \lambda * W \quad (19)$$

Obviamente se da la relación $L \geq L_s$; y con una sencilla regla nemotécnica se puede recordar que:

$$L = \lambda * W \quad (20)$$

$$L_s = \lambda * W_s \quad (21)$$

$$L_q = \lambda * W_q \quad (22)$$

Es decir, el número medio de barcos (totales en sistema, en atraque o servicio o en cola) son siempre el producto de la frecuencia de llegada por el tiempo medio de servicio en la misma condición (totales en sistema, en atraque o servicio o en cola).

A partir de aquí y habiendo definido los parámetros anteriores, los procesos de optimización y planificación pasan por determinar apropiadas leyes de distribución o estadísticos, para poder utilizarlas en aplicaciones prácticas buscando soluciones analíticas (exactas o aproximadas) con los que determinar parámetros tales como:

- Probabilidad de que un muelle este vacío (“ P_0 ”),

- Probabilidad de espera de un buque (" P_q "),
- Probabilidad de que una espera relativa sea mayor o igual que un determinado valor " r " (" P_r "), y ,
- Espera relativa (" η ").

Teniendo herramientas para valorar estos parámetros y fijando como criterio de diseño que las probabilidades de espera y esperas relativas sean menores que ciertos valores (aquel que razonablemente asumirían los usuarios del puerto sin producirse tráficos desviados o sustituciones de modo de transporte) se puede determinar el número de atraques necesarios.

Como se abordará más adelante, estos umbrales se suelen expresar finalmente como un límite concreto del índice de saturación " α " resolviendo las ecuaciones en función de dicho parámetro, es decir haciendo $P_i = f(\alpha)$ ó $\eta = f(\alpha)$. A este límite se le suele denominar tráfico de congestión haciendo referencia al nivel a partir del cual la saturación del sistema es tal que se producen tiempos de espera inadmisibles que hacen que barcos del sistema abandonen o renuncian a entrar al mismo para proceder a realizar sus operaciones por otro puerto o elegir otro modo de transporte sustitutivo.

De aquí que a veces estos métodos se llamen en la literatura portuaria como métodos de minimización de tiempos de espera o de tráficos de congestión (Enríquez, 1968 y Rodríguez, 1985).

Como ya se ha ido anticipando, en una primera fase, la aplicación de QT en planificación portuaria suponía implícitamente adoptar un conjunto de simplificaciones que facilitaban su resolución analítica y exportar soluciones numéricas extraídas de otros campos:

- Las demoras en las operaciones portuarias sólo se deben por la ocupación física de los muelles (es decir no existen demoras inducidas por insuficiencia de otros servicios portuarios). Esto es metodológicamente consistente y suficientemente aproximado en los casos generales, puesto que la provisión de línea de muelle (atraque) es usualmente la opción más cara de entre las disponibles para incrementar la capacidad de un puerto o terminal y el resto de elementos que la determinan (disponibilidad de remolcadores, estibadores, número de grúas, etc...) se ajustan para que ningún barco quede desasistido si este dispone de línea de atraque. Sin embargo, se debe tener siempre en cuenta cuando estas circunstancias no se presentan y aplicar con precaución el método cuando esta simplificación no sea asumible.
- Se considera que el nivel de servicio medio (" μ ") es constante, lo que facilita desde el punto de vista matemático la obtención de soluciones analíticas; pero que no deja de ser una simplificación puesto que el nivel de servicio viene afectado por un conjunto multivariado de factores entre los que destaca el equipamiento portuario, la eficiencia en las operaciones, las

características de pico en las operaciones y las demoras asociadas, las condiciones meteorológicas y su variabilidad, el momento de la operación (inicio, medio o fin de carga o descarga), etc.

En cuanto a la selección de ecuaciones y sistemas, en función de datos reales de tiempos entre llegada de barcos y tiempos de servicio de buques en puerto, muchos son los autores que en una primera aproximación han demostrado para ciertos casos particulares que determinadas terminales/puertos ajustaban suficientemente bien a distribuciones tipo Poisson (exponenciales) tanto en la ley de llegadas de buques como en los tiempo de servicio de los mismos; extremos que confirmaron de acuerdo con los test de bondad de ajuste χ^2 a los que los sometieron³⁶³.

Fratrar *et al.* (1960), artículo discutido posteriormente tanto en Hill (1961) como en Brant (1961), demostraron que el número de barcos que llegan a una terminal comercial siempre que esta fuera pública (no dedicada) y sin asignación previa de *slots* de entrada (es decir criterio FIFO) sigue una distribución que puede representarse a través de leyes de distribución Poisson; y Novaes y Frankel (1966) infirieron a su vez que los tiempos de servicio (" W_s ") en puerto atendiendo a las mismas características anteriores (terminales públicas que sirven a una variabilidad de buques y operaciones) podrían asemejarse también a leyes exponenciales. El estudio de Novaes y Frankel (1966) es posteriormente abordado también por Brown (1967).

Plumlee (1966) sobre el caso de puertos de Ecuador también sugirió una ley de llegadas de buques siguiendo distribuciones tipo Poisson ($k=1$), al igual que Nicolau (1967) matizando en este caso que los atraques del puerto debían considerarse de una manera integral (es decir abriendo la puerta a distintas distribuciones para el caso de terminales individuales y/o dedicadas).

Weille (1968) en un estudio sobre el número óptimo de atraques en un puerto financiado por el Banco Internacional para la Reconstrucción y Desarrollo³⁶⁴ presenta casos prácticos en los que estima la ley de llegada de buques como un fenómeno aleatorio puro de tipo Poisson pero ofrece ejemplos de puertos donde para los tiempos de servicio se pueden considerar funciones Erlang de

³⁶³ El test χ^2 es una prueba utilizada en estadística que mide la discrepancia entre una distribución observada (real) y otra teórica (bondad de ajuste). La fórmula que da el estadístico es la siguiente:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\text{observada}_i - \text{teórica}_i)^2}{\text{teórica}_i}$$

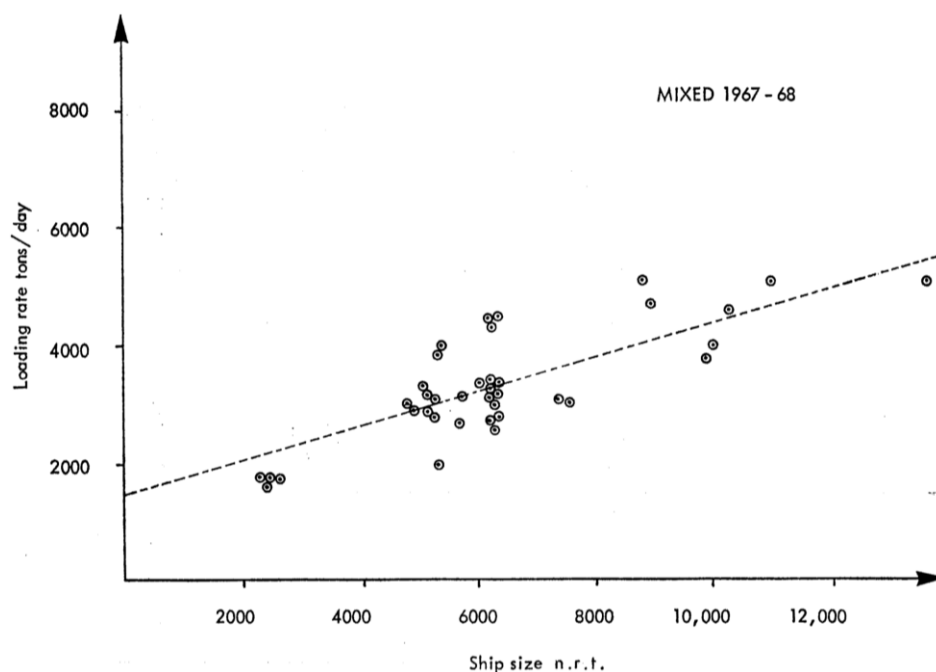
Cuanto mayor sea el valor de χ^2 menos verosímil es que la hipótesis sea correcta. De la misma forma, cuanto más se aproxima a cero el valor de χ^2 , más ajustadas están ambas distribuciones. Para mejor comprensión de este test puede consultarse (Crow *et al.*, 1960)

³⁶⁴ Usualmente conocido como IBRD del acrónimo inglés *International Bank for Reconstruction and Development*. Este es uno de los cinco Bancos que compone el Banco Mundial (con sede en Washgiton, Estados Unidos) y que originalmente (fue creado en 1944). Esta institución surgió para promover la reconstrucción en aquellos países afectados por la II Guerra Mundial. Más tarde, en 1990 se crearía el *European Bank for Reconstruction and Development* (EBRD) promovido por la Unión Europea y con sede en Londres (Reino Unido).

fase 2 (Puerto de Callao, Perú) e incluso fase 3 (Puerto de Bangkok, Tailandia) trabajando por tanto con modelos del tipo $M/E_2/n$ y $M/E_3/n$.

Edmon (1975) estudió las leyes de distribución en el caso de terminales de contenedores, distinguiendo casos cuando son usados por más de un usuario (no dedicadas) y cuando son gestionados por un único actor (dedicadas). Para este autor, aun cuando los operadores programan con mayor exactitud (regularidad) sus llegadas a puertos, las funciones de llegada no son funciones constantes ya que los retrasos en el transporte por mal tiempo o inferidas por operaciones previas y la falta de coordinación entre agentes (diferentes compañías navieras) hacen perder la regularidad. Por ello sugiere la aplicación de distribuciones Erlang de orden k . Para escoger la fase de la función Erlang que mejor ajustaba sometió los datos reales de llegadas en varios terminales de contenedores a test de bondad de ajuste χ^2 . Los trabajos de este autor fueron continuados en Edmon y Maggs (1976 y 1978) en un caso práctico en las terminales de contenedores de los puertos del Reino Unido y se vieron influenciados por los trabajos previos de Heaver y Studer (1972) que estudiaron el tamaño de buques y ratios de carga para diferentes tipo de tráfico (fundamentalmente graneles) llegando a la conclusión de cierta relación entre ellos pero sin ofrecer datos concluyentes sobre las leyes de distribución de tiempos de servicio (ilustración 282).

Ilustración 282. Relación entre el tamaño del buque y los ratios de carga.



Fuente: Heaver y Studer (1972).

De igual modo Noritake (1978) y Noritake y Kimura (1980 y 1983b) y la UNCTAD (1979 y 1985) abordan esta cuestión entrando a discutir cual debía ser el orden k más apropiado. Este tipo

de estudios se vuelve más habitual a partir de entonces de tal manera que la QT penetra de una manera destacada en los estudios de planificación portuaria.

Así, en el caso de tiempos de servicio la UNCTAD (1979 y 1985) y Jagerman y Altioik (2003) sugieren que se utilice una distribución de probabilidad Erlang de forma o fase 2 (E_2) para todo tipo de terminales.

Lan y Teng (1990) retoman estudios prácticos sobre sistemas M/M/n con el objetivo de determinar el número óptimo de atraques en una terminal.

A iguales conclusiones llega Gökkus (1995) al estudiar los sistemas de llegada y tiempos de servicio en casos particulares como el de puertos pesqueros, con aplicación práctica al caso del puerto de Güzelbache (Turquía) donde con análisis de datos reales llegó a un nivel de confianza superior al 99% utilizando los test de bondad de ajuste χ^2 si se adoptan distribuciones Poisson o exponenciales negativas tanto en llegadas como en tiempo de servicio. Estos autores trabajan por lo tanto con sistemas M/M/n.

Siguiendo la línea de investigación sobre terminales de contenedores, Kia *et al.* (2002) determinaron para el caso concreto de Melbourne (Australia) con una terminal de cuatro atraques y en base a datos del año 1999 (372 llegadas) que la ley inter-llegada de buques efectivamente ajustaba a una función Poisson, mientras que la distribución de tiempos de servicio ajustaba mejor a una Erlang de fase 4 (E_4), ofreciendo soluciones para el sistema M/ E_4 /4.

Kuo *et al.* (2006) siguieron profundizando en este caso particular de contenedores y volvían a confirmar las tesis de autores anteriores en lo que se refiere a llegada de buques (inter-llegadas en proceso Poisson), pero contradiciendo a éste último y a otros estudios en los que se asimilaban las leyes de distribución de tiempos de servicio de este tipo de terminales con servicios regulares a funciones deterministas ($K=\infty \rightarrow$ ley de llegadas constantes) o con elevadas k .

Estos autores determinaron que si bien las leyes de distribución que presentaban se ajustaban efectivamente a funciones Erlang de orden k en realidad el parámetro k era función del tipo de terminal (dedicada o pública) y el tamaño del sistema (atraque simple, conjunto de atraques o puerto conjunto) y en ningún caso siendo $k=\infty$; e incluso sugiriendo que debe adoptarse $k=1$ (exponencial) en el caso de varios atraques o análisis de un puerto en conjunto.

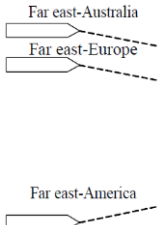
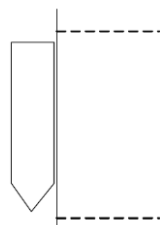
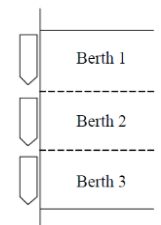
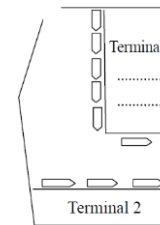
En dichos estudios establecieron como criterio general y lo demostraron analíticamente en base a datos sometidos a test de bondad ajuste χ^2 y test Kolomogoroc-Smirnov³⁶⁵ que a medida que el sistema crece (puerto con varias terminales o terminales con varios atraques) la k tiende a

³⁶⁵ Test estadístico dentro de la familia de pruebas no paramétricas que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí. La estadística no paramétrica estudia modelos estadísticos cuya distribución no se ajusta a criterios paramétricos, es decir, no puede ser definida apriorísticamente y se basa en datos observados.

disminuir (llegando a ser incluso un fenómeno prácticamente aleatorio, con distribución Poisson $k=1$ en sistemas portuarios grandes); mientras que la k tiende a ser mayor cuanto mayor es el grado de dedicación de la terminal, presentando como caso máximo y excepcional un simple atraque servido con una única línea en el que la k se aproxima a cinco (5).

En la tabla 33 se resumen las conclusiones del estudio de Kuo *et al.* (2006).

Tabla 33. Funciones de distribución aplicables a diferentes tipos de terminales de contenedores.

Tipo de Sistema	Único atraque servido por una única línea regular	Único atraque servido por varias líneas regular	Única terminal dedicada con varios atraques y servido por varias líneas	Puerto con varias terminales y servido por distintas líneas
Esquema del sistema				
Parámetro “k” teórico	5.462	Terminal Pública 0.175 – 1.798 Terminal Dedicada 1.35 – 2.096	1	1
Parámetro “k” propuesto	5	1-2	1	1

Fuente: Kuo *et al.* (2006).

Para el caso concreto del puerto de Alejandría (Egipto) y de mercancía general (excluyendo los atraques puramente de contenedores) y tras realizar test de bondad de ajuste sobre observaciones de tiempos de llegada y servicio en un año completo (01/07/2007 a 30/06/2008), El-Naggar (2010) propone funciones Poisson para la llegada de buques y Erlang orden 3 (E_3) para tiempos de servicio; destacando que el sistema estudiado es multi-atraque (32 puestos) con *lay-out* complejo y limitaciones operativas en cuanto a longitud y/o calado de muchos muelles que parecen conducir a unas características especiales y de poco rendimiento. El sistema por este autor estudiado es, por tanto, un $M/E_3/32$.

En otra aplicación práctica, este caso comparando las leyes de distribución de llegadas y tiempos de servicio en terminales de contenedores del puerto de Valencia (España), López *et al.* (2011) en base a unos datos históricos de observaciones reales determinaron que tanto para el caso de terminal pública (Marítima Valenciana) como dedicada (terminal MSC) los intervalos de llegadas siempre se ajustaban a distribuciones markovianas tipo Poisson, mientras que dependiendo del año y de la terminal los tiempos de servicio ajustaban a funciones de distribución E_4 o E_5 para terminales públicas o E_5 - E_7 para terminales dedicadas. En la

tabla 34 se muestra el resultado de las investigaciones de estos autores.

Tabla 34. Distribuciones de intervalo entre llegadas y tiempos de servicio en terminales de contenedores (públicas y dedicadas) del puerto Valencia (España).

Marítima Valenciana (terminal Pública multicliente)	Intervalo de llegadas	M (Poisson)	M (Poisson)	M (Poisson)	M (Poisson)
	Servicio	E ₅	E ₅	E ₄	E ₄
Terminal SMC (terminal dedicada monocliente)	Intervalo de llegadas	M (Poisson)	M (Poisson)	M (Poisson)	M (Poisson)
	Servicio	E ₅	E ₆	E ₆	E ₇

Fuente: López *et al.* (2011).

Martín (2012) nuevamente para el caso de terminales de contenedores multi-ataque sugería, aunque esta vez sin la base de estudios de casos reales concretos sino de revisión bibliográfica, la utilización de funciones de orden 4 (E₄) para los tiempos de servicio cualquiera que fuera su carácter (mayor o menor regularidad / públicos o privados) y sin embargo distribuciones Poisson en el caso de terminales públicas o de orden 2 (E₂) en el caso de terminales sujetas a alta regularidad de llegadas, es decir sistemas tipo M/E₄/N (terminales sin servicios regulares predominantes) o E₂/E₄/N (terminales con servicios regulares).

Vianen *et al.* (2012), que centran sus casos de estudios en terminales de graneles sólidos, indican que: i) en el caso de terminales de importación con un único usuario (dedicadas) se utilicen para la llegada funciones de probabilidad Erlang-2 (E₂); ii) para las terminales públicas multiusuario de importación distribuciones de tipo Poisson; y, iii) para terminales dedicadas de exportación incluso funciones de distribución normal.

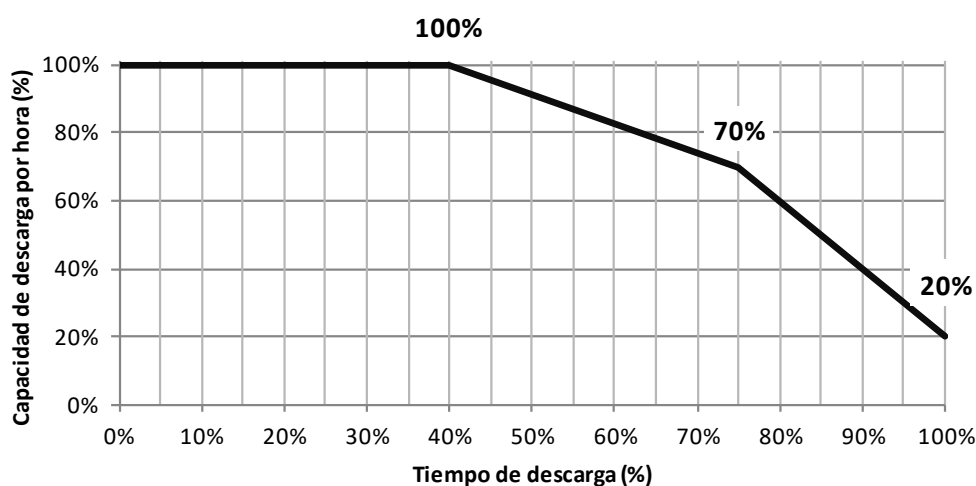
En el caso de tiempos de servicio, estos mismos autores (Vianen *et al.*, 2012) han abierto nuevas líneas de investigación y han sugerido que para la obtención de unos resultados más precisos en el caso de muelles de graneles sólidos es más relevante utilizar funciones de distribución de tonelajes de los barcos (es decir, no utilizar directamente la variable tiempo como estadístico si no variables en relación al tamaño de los buques³⁶⁶) y tener en cuenta el efecto de variación de los ritmos de descarga / carga a lo largo de la propia operación. Efectivamente, si la media del servicio no se mantiene constante (algo que responde a la realidad pero más acusadamente en los

³⁶⁶ El efecto que introducía el tamaño de los buques a los ritmos de descarga ya había sido analizado por Heaver y Studer (1972).

graneles sólidos) no se cumple una de las condiciones de resolución matemática las técnicas QT que se habían impuesto como una de sus premisas simplificadoras.

Estos autores sugieren que, tal y como se observa en la ilustración 283, en las descargas se consigue aproximadamente el 100% de la capacidad teórica hasta que se ha realizado el 40% de la carga, descendiendo hasta el 70% de una manera lineal cuando se ha realizado aproximadamente el 75% de la carga y en una nueva línea recta hasta el 20% hasta que se completa la descarga. El descenso de los ritmos tiene que ver con la mayor dificultad de extracción del material según las bodegas del buque se van vaciando.

Ilustración 283. Variación de los ritmos de descarga en un buque de graneles sólidos.



Fuente: Elaboración propia con datos de Vianen *et al.* (2012).

Esto era ya apuntado de una manera conceptual por la UNCTAD (1979 y 1985) puesto que para los tiempos de servicio de muelles de graneles proponían el uso de $k=2$ en el caso de que la variabilidad del tamaño de los buques fuera grande o de $k=8$ si el tamaño de los buques era casi constante como pasa en gran número de terminales especializadas y/o monocliente dedicadas a un tráfico muy específico con destinos muy recurrentes y servicios de tipo circular.

Saeeda y Larsenb (2016) al estudiar la ley de llegada de buques a la terminal de contenedores de Manila (Filipinas) observan como la misma se ajusta a una distribución de Poisson, confirmando datos empíricos de otros investigadores anteriores.

En efectos, todos estos estudios y un gran número de otros no citados sobre datos reales de muchas terminales y sistemas portuarios han seguido confirmando estas hipótesis para casos concretos:

- Leyes de llegadas de buques con distribuciones Poisson (aleatorio) en un amplio rango de tipo de terminales y en casos particulares con funciones Erlang de distinto grado (usualmente 2 pero con un valor máximo y excepcionalmente grande en el entorno de $k=5$ para terminales de contenedores de un único atraque servido por una única línea regular)

- Leyes de servicio de buques que varían desde funciones puramente exponenciales a funciones Erlang de orden superior $k=2-7$.

En la tabla 35 se resumen las distribuciones propuestas por diferentes autores.

Tabla 35. Funciones de distribución propuesta por diferentes autores.

Tipo de terminal	Ley de llegadas buques. Función propuesta / Autor	Ley de servicio Función propuesta / Autor
Terminales públicas no dedicadas	Poisson (Exponencial) Crow <i>et al.</i> (1960) y Fratar <i>et al.</i> (1960)	Exponencial Novaes y Frankel (1966)
Puerto completo	Poisson (Exponencial) Plumlee (1966) y Nicolau (1967)	-
Todo tipo de terminales (no especializadas)	Poisson (Exponencial) UNCTAD (1979 y 1985) Weille (1968)	Exponencial UNCTAD (1979 y 1985) Erlang 2 o 3 (E_2 y E_3) Weille (1968)
Todo tipo de terminales (especializadas)	Erlang 2 (E_2) UNCTAD (1979 y 1985)	Erlang 2 (E_2) UNCTAD (1979 y 1985) Jagerman y Altioek (2003)
Mercancía general (excluidos terminales de contenedores) con varios atraques (y limitaciones longitud/calado de muelles)	Poisson (Exponencial) El-Naggar (2010)	Erlang 3 (E_3) El-Naggar (2010)
Contenedores de un atraque y servicio regular con una única línea regular	Erlang 5 (E_5) Kuo <i>et al.</i> (2006)	
Contenedores públicas de un atraque y servicio regular con varias líneas regulares	Poisson (Exponencial) Kuo <i>et al.</i> (2006)	-
Contenedores privadas de un atraque y servicio regular con varias líneas regulares	Erlang 2 (E_2) Kuo <i>et al.</i> (2006)	-
Contenedores (pública o con poco predominio de líneas regulares) con varios atraques o puertos con varios terminales	Poisson (Exponencial) Kuo <i>et al.</i> (2006) López <i>et al.</i> (2011) UNCTAD (2012)	Erlang 4 (E_4) Kia <i>et al.</i> (2002) UNCTAD (2012) Erlang 4 (E_4) - Erlang 5 (E_5) López <i>et al.</i> (2011)

Tipo de terminal	Ley de llegadas buques. Función propuesta / Autor	Ley de servicio Función propuesta / Autor
Contenedores (pública o privada) con varios atraques o puertos con varios terminales	Poisson (Exponencial) Kuo <i>et al.</i> (2006) López <i>et al.</i> (2011) Saeeda y Larsenb (2016). Erlang 2 (E ₂) UNCTAD (2012)	Erlang 4 (E ₄) UNCTAD (2012) Erlang 5 (E ₅) - Erlang 7 (E ₇) López <i>et al.</i> (2011)
Graneles especializados	Erlang 2 (E ₂) UNCTAD (1979 y 1985)	Erlang 2 (E ₂) (tamaño de los barcos variable) y Erlang 8 (E ₈) (si el tamaño de los barcos casi constante) UNCTAD (1979 y 1985)
Graneles Importación con único usuario (dedicadas)	Erlang 2 (E ₂) Vianen <i>et al.</i> (2012)	Funciones de distribución por tonelaje de barcos (no por tiempos efectivos de operación) Vianen <i>et al.</i> (2012)
Graneles importación con varios usuarios (públicas)	Poisson (Exponencial) Vianen <i>et al.</i> (2012)	Funciones de distribución por tonelaje de barcos (no por tiempos efectivos de operación) Vianen <i>et al.</i> (2012)
Graneles exportación	Normal Vianen <i>et al.</i> (2012)	Funciones de distribución por tonelaje de barcos (no por tiempos efectivos de operación) Vianen <i>et al.</i> (2012)
Terminales pesqueras	Poisson (Exponencial) Gökkus (1995)	Exponencial Negativa Gökkus (1995)

Fuente: Elaboración propia.

Como conclusión se puede indicar que el tipo de distribución depende de una serie de características del puerto y de la terminal (tamaño), grado de especialización (dedicada/no dedicada; pública/privada) y su estructura de tráfico (regularidad de sus líneas) que hace necesario someter a test de ajustes en cada caso estudiado (si se dispone de datos) las leyes inter-llegada de buques y de servicio en puerto.

En ausencia de datos específicos y observaciones reales (algo que no es raro que ocurra en el caso de puertos existentes por falta de estadísticas precisas o que siempre ocurrirá en el caso de diseño de nuevos puertos sin registros históricos a utilizar) se podría utilizar:

- Para el tiempo entre llegada de buques: Distribuciones markovianas (Poisson) para un amplio rango de casos; excepción hecha de terminales altamente especializadas / servicios muy regulares o de graneles con único usuario donde se propondría una E_2 , graneles de exportación donde se podría incluso aproximar a funciones normales y terminales de contenedores con único atraque donde se usaría también la E_2 si está servida por varias líneas regulares o E_5 si está servido por una única línea regular.
- Para el tiempo de servicio de buques: Exponenciales en el caso de terminales pesqueras o cualquier tipo de terminal no especializadas; E_2 para terminales de graneles con variación del tamaño de buques; E_3 para terminales de mercancía general (no puramente contenedorizada); E_4 para terminales públicas contenedorizadas con varios atraques; E_5/E_7 para terminales privadas contenedorizadas con varios atraques o E_8 para terminales de graneles con tamaños de buques cuasi-constante; reforzando la idea de que la fase (k) de la función crece con el grado de especialización y tamaño del sistema pero nunca alcanzando funciones constantes (distribuciones deterministas con tiempos de servicio constante) aun cuando la terminales presenten un alto grado de regularidad.

4. Resolución analítica de diferentes sistemas.

Una vez que ha sido discutido en función de diversas referencias bibliográficas y reseñas de diferentes autores cuales es el sistema de colas de mayor aplicación en cada caso ([1/2/3] en notación Kendall simplificada para tamaño del sistema y número de clientes infinito y reglas de asignación FIFO), cabe proporcionar soluciones analíticas a dichos sistemas como paso previo a su aplicación práctica en planificación portuaria.

En primer lugar, debe aclararse que las soluciones que se presentan son aplicables en régimen estable, es decir obviando la primera fase transitoria en la cual se empieza formar la cola. Dicha fase transitoria carece de utilidad práctica real (por alcanzarse la fase estable en un puerto en tiempo relativamente corto) e introduce además una dificultad analítica a la hora de obtener resultados desde una perspectiva matemática; resultados que por otra parte tienen relativa poca trascendencia práctica ya que las situaciones de congestión no se suelen dar con terminales recién construidas sino cuando la demanda alcanza cierto grado de madurez.

De igual modo, se vuelve a recalcar que se proporcionarán directamente los resultados sin entrar al desarrollo detallado de su formulación matemática que escapa del objeto del anejo de esta tesis y que puede ser consultada por referencia a las citas bibliográficas que se citan al final del documento.

Las resoluciones para leyes de llegadas y de servicio encuentran soluciones analíticas exactas solamente para un limitado número de casos como son:

- Para un único ataque cuando al menos una de las dos funciones de distribución es markoviana, es decir bien la ley de servicio, bien la ley de llegada de buques es exponencial siendo la otra cualquiera (es decir sistemas $M/G/1$ o $G/M/1$).
- Para cualquier número de ataques: Cuando ambas distribuciones son exponenciales (sistemas tipo $[M/M/n]$).

Estos casos (soluciones exactas) se agruparán en un primer subapartado de este anejo (3.1), mientras que las soluciones aproximadas serán objeto de un segundo epígrafe (3.2) dentro de este punto.

4.1.Soluciones Exactas: Sistemas $M/M/n$; $G/M/1$ y $M/G/1$

Como se ha comentado, la QT sólo proporciona soluciones exactas para limitados casos, aunque de mucha utilidad en el caso portuario por su amplio rango de aplicación. Estas son:

- Ambas funciones de distribución exponenciales para cualquier número de ataques (es decir $M/M/N$).
- Un único ataque y al menos una de las dos funciones de distribuciones anteriores exponenciales (es decir un sistema $M/G(z)/1$ o $G(\gamma)/M/1$)

4.1.1. Sistema $M/M/n$.

En la tabla 36 se representan los valores que adoptan las variables más representativas del sistema para el caso $M/M/N$. Además, y toda vez que las ecuaciones se simplifican notablemente para los casos de uno o dos ataques se aprovecha para representar su particularización en la tabla 37 ya que estos pueden ser de utilidad para un conjunto amplio de aplicaciones prácticas.

Tabla 36. Ecuaciones relativas a sistemas markovianos M/M/N.

	Sistema M/M/N Leyes de llegada y servicio exponenciales para cualquier número de atraques
P_0 Probabilidad de que un muelle este vacío	$P_0 = \frac{1}{\frac{(N \cdot \alpha)^N}{N! \cdot (1 - \alpha)} + \sum_{j=0}^{N-1} \frac{(N \cdot \alpha)^j}{j!}} \quad (23)$
P_q Probabilidad de espera de un buque	$P_q = \frac{(N \cdot \alpha)^N}{N! \cdot (1 - \alpha)} \cdot P_0 = \eta \cdot N \cdot (1 - \alpha) \quad (24)$
P_r Probabilidad de que una espera relativa sea mayor o igual que un determinado valor “r”	$P_r = P_q \cdot e^{N \cdot r \cdot (\alpha - 1)} \quad (25)$
η Espera relativa	$\eta = \frac{P_q}{N \cdot (1 - \alpha)} \quad (26)$
L_q Número de barcos en cola	$L_q = \eta \cdot \alpha \cdot N = P_q \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (27)$
L_s Número de barcos en servicio = Número de atraques ocupados	$L_s = \alpha \cdot N \quad (28)$
L Numero de barcos en el sistema ($L_s + L_q$)	$L = L_s + L_q = \alpha \cdot \left(N + \frac{P_q}{1 - \alpha} \right) \quad (29)$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Ecuaciones relativas a sistemas M/M/1 y M/M/2.

	Sistema M/M/1 Leyes de llegada y servicio exponenciales con un único ataque	Sistema M/M/2 Leyes de llegada y servicio exponenciales con dos ataques muelle
P_0 Probabilidad de que un muelle este vacío	$P_0 = 1 - \alpha$ (30)	$P_0 = (1 - \alpha) / (1 + \alpha)$ (31)
P_q Probabilidad de espera de un buque	$P_q = \alpha$ (32)	$P_q = 2 \cdot \alpha^2 / (1 + \alpha)$ (33)
P_r Probabilidad de que una espera relativa sea mayor o igual que un determinado valor “r”	$P_r = P_q \cdot e^{r \cdot (1 - \alpha)}$ (34)	$P_r = P_q \cdot e^{2r \cdot (1 - \alpha)}$ (35)
η Espera relativa	$\eta = \alpha / (1 - \alpha)$ (36)	$\eta = \alpha^2 / (1 - \alpha^2)$ (37)
L_q Número de barcos en cola	$L_q = \eta \cdot \alpha = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha}$ (38)	$L_q = \eta \cdot \alpha \cdot 2 = \frac{2\alpha^3}{1 - \alpha^2}$ (39)
L_s Número de barcos en servicio = Número de ataques ocupados	$L_s = \alpha$ (40)	$L_s = 2 \cdot \alpha$ (41)
L Numero de barcos en el sistema ($L_s + L_q$)	$L = L_s + L_q = \frac{1}{1 - \alpha}$ (42)	$L = L_s + L_q = 2 \cdot \alpha \cdot (1 + \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2})$ (43)

Fuente: Elaboración propia.

A continuación y con objeto de facilitar su aplicación práctica y discusión teórica se muestran las tablas de cada uno de estos parámetros en función de la tasa de ocupación (“ α ”) y del número de ataques (“N”) (tabla 38 a tabla 43).

Tabla 38. Probabilidad (P_0) de muelle vacío en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.

P_0 (Probabilidad de que un muelle este vacío)										
Sistema M/M/N										
Tasa Ocupación α	Numero de Atraques									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0,950	0,905	0,861	0,819	0,779	0,741	0,705	0,670	0,638	0,607
0,10	0,900	0,818	0,741	0,670	0,607	0,549	0,497	0,449	0,407	0,368
0,15	0,850	0,739	0,637	0,549	0,472	0,407	0,350	0,301	0,259	0,223
0,20	0,800	0,667	0,548	0,449	0,368	0,301	0,247	0,202	0,165	0,135
0,25	0,750	0,600	0,471	0,367	0,286	0,223	0,174	0,135	0,105	0,082
0,30	0,700	0,538	0,403	0,300	0,223	0,165	0,122	0,091	0,067	0,050
0,35	0,650	0,481	0,345	0,245	0,173	0,122	0,086	0,061	0,043	0,030
0,40	0,600	0,429	0,294	0,199	0,134	0,090	0,061	0,041	0,027	0,018
0,45	0,550	0,379	0,250	0,162	0,104	0,067	0,043	0,027	0,017	0,011
0,50	0,500	0,333	0,211	0,130	0,080	0,049	0,030	0,018	0,011	0,007
0,55	0,450	0,290	0,176	0,105	0,061	0,036	0,021	0,012	0,007	0,004
0,60	0,400	0,250	0,146	0,083	0,047	0,026	0,014	0,008	0,004	0,002
0,65	0,350	0,212	0,119	0,065	0,035	0,019	0,010	0,005	0,003	0,001
0,70	0,300	0,176	0,096	0,050	0,026	0,013	0,007	0,003	0,002	0,001
0,75	0,250	0,143	0,075	0,038	0,019	0,009	0,004	0,002	0,001	0,000
0,80	0,200	0,111	0,056	0,027	0,013	0,006	0,003	0,001	0,001	0,000
0,85	0,150	0,081	0,040	0,019	0,008	0,004	0,002	0,001	0,000	0,000
0,90	0,100	0,053	0,025	0,011	0,005	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
0,95	0,050	0,026	0,012	0,005	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Probabilidad (P_q) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.

P_q (Probabilidad de espera de un barco)										
Sistema M/M/N										
Tasa Ocupación α	Numero de Atraques									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0,050	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,10	0,100	0,018	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,15	0,150	0,039	0,011	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,20	0,200	0,067	0,025	0,010	0,004	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
0,25	0,250	0,100	0,044	0,020	0,010	0,005	0,002	0,001	0,001	0,000
0,30	0,300	0,138	0,070	0,037	0,020	0,011	0,006	0,004	0,002	0,001
0,35	0,350	0,181	0,102	0,060	0,036	0,022	0,014	0,009	0,006	0,004
0,40	0,400	0,229	0,141	0,091	0,060	0,040	0,027	0,018	0,013	0,009
0,45	0,450	0,279	0,186	0,129	0,091	0,065	0,047	0,035	0,026	0,019
0,50	0,500	0,333	0,237	0,174	0,130	0,099	0,076	0,059	0,046	0,036
0,55	0,550	0,390	0,293	0,227	0,179	0,143	0,115	0,094	0,076	0,063
0,60	0,600	0,450	0,355	0,287	0,236	0,197	0,165	0,140	0,119	0,101
0,65	0,650	0,512	0,421	0,354	0,303	0,261	0,227	0,198	0,174	0,154
0,70	0,700	0,576	0,492	0,429	0,378	0,336	0,301	0,271	0,245	0,222
0,75	0,750	0,643	0,568	0,509	0,462	0,422	0,387	0,357	0,330	0,307
0,80	0,800	0,711	0,647	0,596	0,554	0,518	0,486	0,458	0,432	0,409
0,85	0,850	0,781	0,730	0,689	0,654	0,624	0,597	0,573	0,550	0,530
0,90	0,900	0,853	0,817	0,788	0,762	0,740	0,720	0,702	0,685	0,669
0,95	0,950	0,926	0,907	0,891	0,878	0,866	0,854	0,844	0,835	0,826

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Espera relativa ($\eta=Wq/Ws$) de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.

η (Espera relativa)										
Sistema M/M/N										
Tasa Ocupación α	Numero de Atraques									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0,053	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,10	0,111	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,15	0,176	0,023	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,20	0,250	0,042	0,010	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,25	0,333	0,067	0,020	0,007	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
0,30	0,429	0,099	0,033	0,013	0,006	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000
0,35	0,538	0,140	0,053	0,023	0,011	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001
0,40	0,667	0,190	0,078	0,038	0,020	0,011	0,006	0,004	0,002	0,001
0,45	0,818	0,254	0,113	0,058	0,033	0,020	0,012	0,008	0,005	0,003
0,50	1,000	0,333	0,158	0,087	0,052	0,033	0,022	0,015	0,010	0,007
0,55	1,222	0,434	0,217	0,126	0,079	0,053	0,037	0,026	0,019	0,014
0,60	1,500	0,563	0,296	0,179	0,118	0,082	0,059	0,044	0,033	0,025
0,65	1,857	0,732	0,401	0,253	0,173	0,124	0,093	0,071	0,055	0,044
0,70	2,333	0,961	0,547	0,357	0,252	0,187	0,143	0,113	0,091	0,074
0,75	3,000	1,286	0,757	0,509	0,369	0,281	0,221	0,178	0,147	0,123
0,80	4,000	1,778	1,079	0,746	0,554	0,431	0,347	0,286	0,240	0,205
0,85	5,667	2,604	1,623	1,149	0,873	0,693	0,569	0,477	0,408	0,353
0,90	9,000	4,263	2,724	1,969	1,525	1,234	1,029	0,877	0,761	0,669
0,95	19,00	9,256	6,047	4,457	3,511	2,885	2,441	2,110	1,855	1,651

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Número de barcos en cola (L_q) (Sistema M/M/N).

L_q (Número de barcos en cola)										
Tasa Ocupación α	Numero de Atraques									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,55	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,60	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0,65	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0,70	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,75	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
0,80	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2
0,85	5	4	4	4	4	4	3	3	3	3
0,90	8	8	7	7	7	7	6	6	6	6
0,95	18	18	17	17	17	16	16	16	16	16
0,96	23	23	22	22	22	21	21	21	21	21
0,97	31	31	31	30	30	30	29	29	29	29
0,98	48	48	47	47	47	46	46	46	46	45
0,985	65	64	64	63	63	63	63	63	62	62

Tabla 42. N° barcos en servicio (L_s) (Sistema M/M/N).

L_s (Número de barcos en servicio) (atraques ocupados)										
Tasa Ocupación α	Numero de Atraques									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0,10	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0,15	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2
0,20	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2
0,25	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3
0,30	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
0,35	0	1	1	1	2	2	2	3	3	4
0,40	0	1	1	2	2	2	3	3	4	4
0,45	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5
0,50	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
0,55	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6
0,60	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6
0,65	1	1	2	3	3	4	5	5	6	7
0,70	1	1	2	3	4	4	5	6	6	7
0,75	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8
0,80	1	2	2	3	4	5	6	6	7	8
0,85	1	2	3	3	4	5	6	7	8	9
0,90	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9
0,95	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,96	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,97	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,98	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,985	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fuente: Elaboración propia.

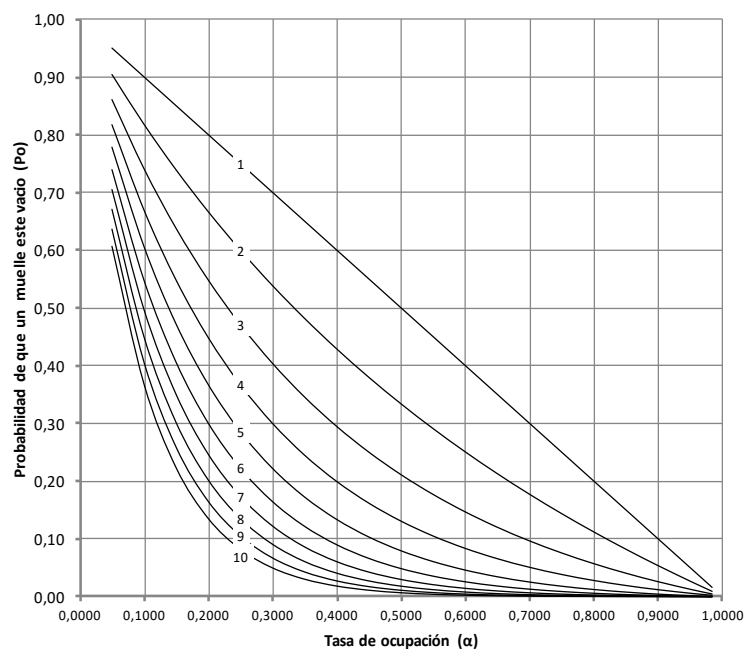
Tabla 43. Número de barcos en el sistema (L) (Sistema M/M/N).

L (Número de barcos en el sistema (en servicio+ en cola))										
Tasa Ocupación α	Numero de Atraques									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0,10	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0,15	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2
0,20	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2
0,25	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3
0,30	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
0,35	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4
0,40	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4
0,45	1	1	2	2	2	3	3	4	4	5
0,50	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
0,55	1	2	2	2	3	3	4	5	5	6
0,60	2	2	2	3	3	4	4	5	6	6
0,65	2	2	3	3	4	4	5	6	6	7
0,70	2	3	3	4	4	5	6	6	7	8
0,75	3	3	4	5	5	6	6	7	8	8
0,80	4	4	5	6	6	7	8	8	9	10
0,85	6	6	7	7	8	9	9	10	11	12
0,90	9	9	10	11	11	12	13	14	14	15
0,95	19	19	20	21	21	22	23	24	24	25
0,96	24	24	25	26	26	27	28	29	29	30
0,97	32	33	33	34	35	36	36	37	38	39
0,98	49	49	50	51	51	52	53	54	54	55
0,985	66	66	67	67	68	69	70	70	71	72

Fuente: Elaboración propia.

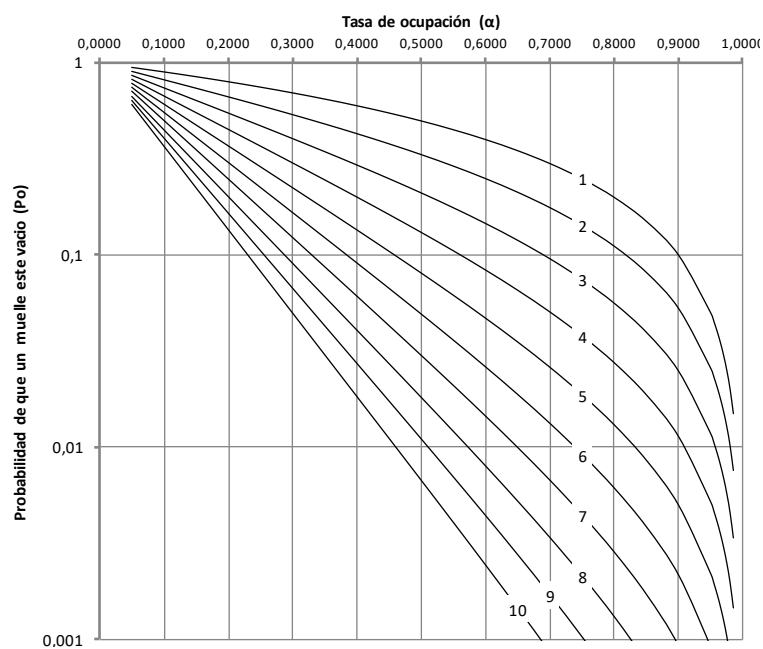
Para una más fácil utilización práctica en forma de ábacos se pueden representar los valores de las tablas anteriores, es decir de P_0 (probabilidad de muelle vacío), P_q (probabilidad de espera de un barco), L (número de barcos en sistema), L_q (número de barcos en cola) o L_s (número de barcos servidos o número de atraques utilizados) con una escala decimal en el eje de ordenadas (más práctica para tasas de ocupación altas) o con una escala logarítmica (de más fácil utilización para tasas de ocupación bajas) (ilustración 284 a ilustración 290).

Ilustración 284. Probabilidad (P_0) de que un muelle este vacío en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala decimal).



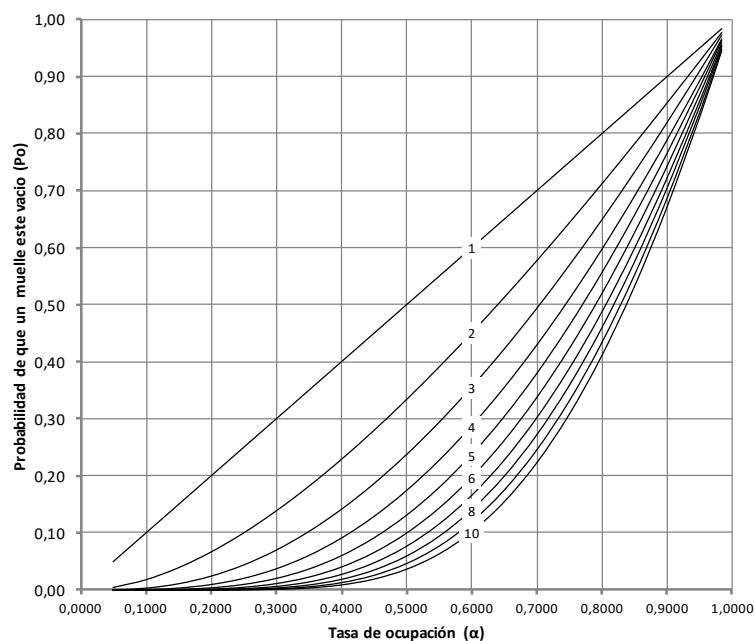
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 285. Probabilidad (P_0) de que un muelle este vacío en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala logarítmica).



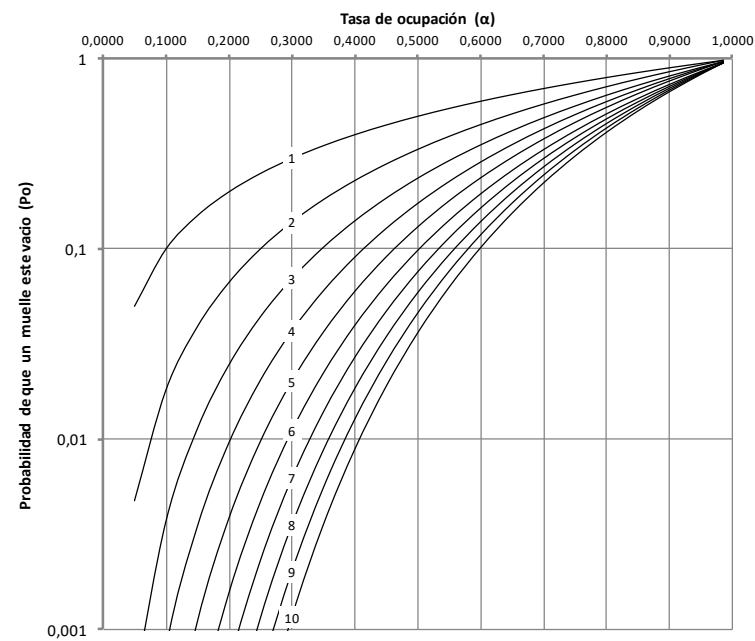
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 286. Probabilidad (P_q) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala decimal).



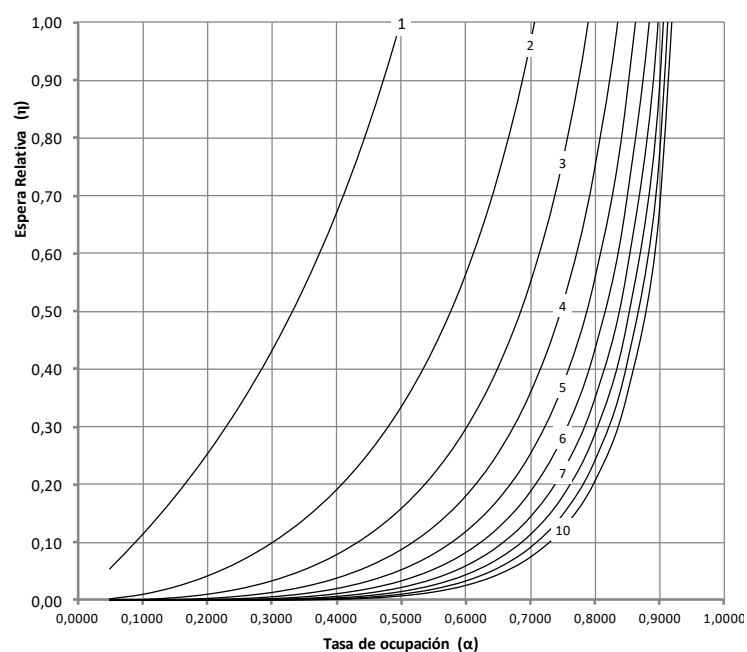
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 287. Probabilidad (P_q) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n (Escala logarítmica).



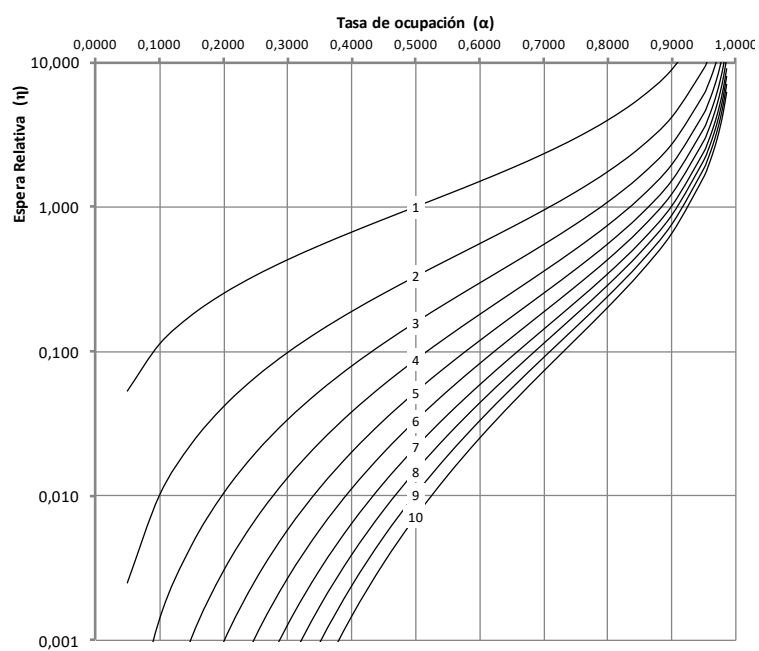
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 288. Espera relativa en un sistema M/M/n (escala decimal).



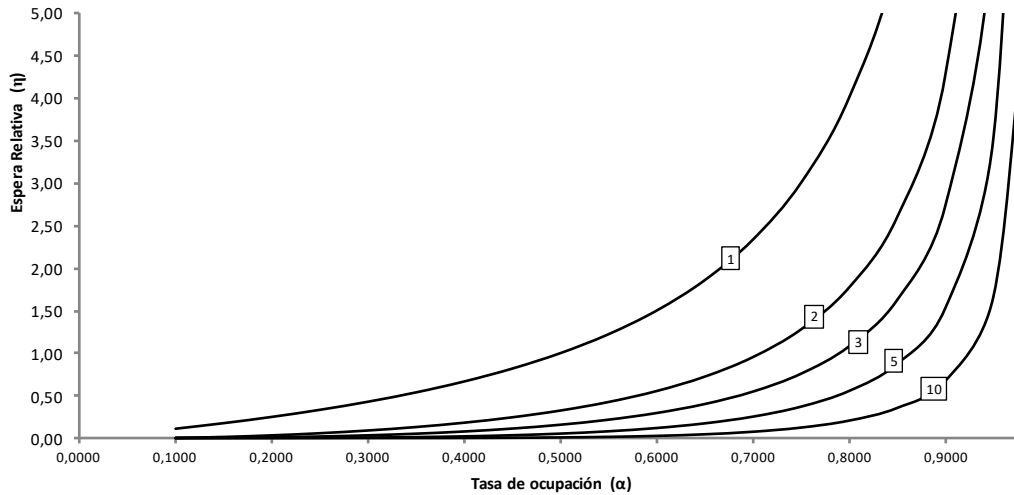
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 289. Espera relativa en un sistema M/M/n (escala logarítmica).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 290. Espera relativa ($\eta=W_q/W_s$) de espera de un barco en función de la tasa de ocupación y número de atraques en un sistema M/M/n.



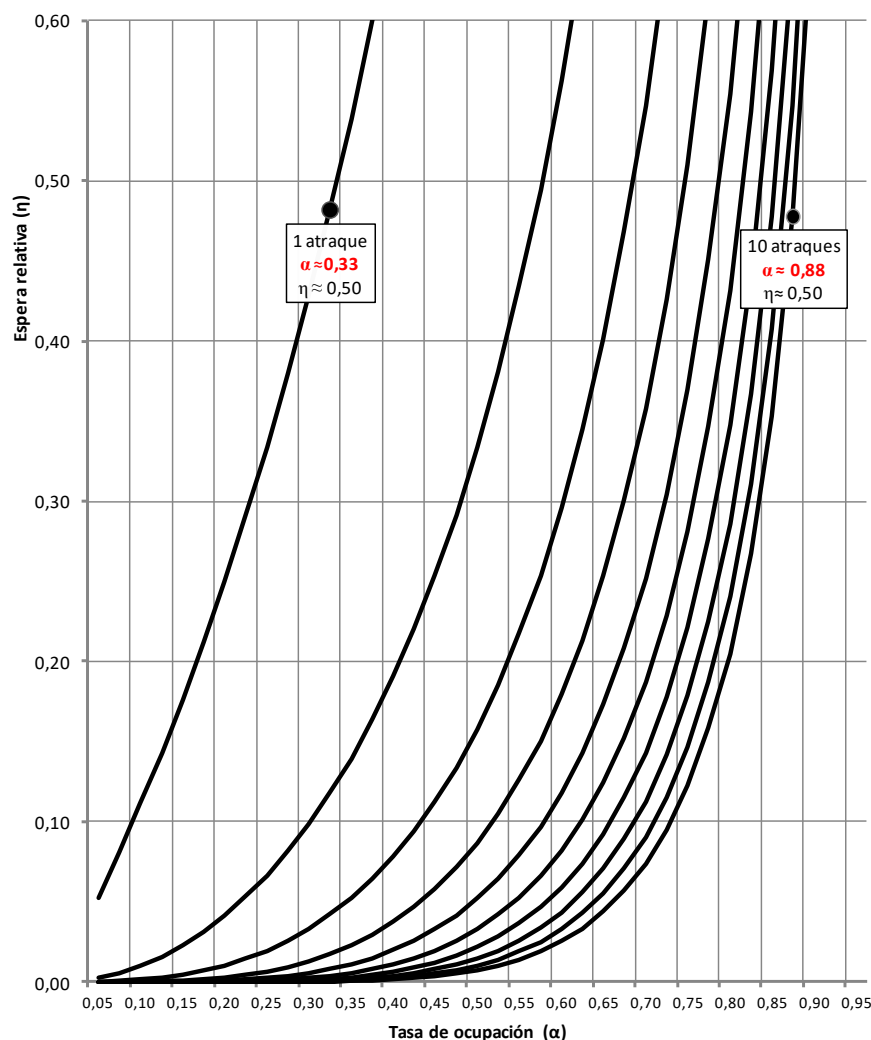
Fuente: Elaboración propia.

Analizando las gráficas anteriores se observa, como no podía ser de otra manera, que conforme va aumentando la tasa de ocupación, aumenta la probabilidad de espera de un buque y disminuye la probabilidad de que todos los muelles estén vacíos.

La espera relativa (o relación entre la espera de buque y el tiempo de servicio) crece de igual modo con la tasa de ocupación, en un principio de una manera muy lenta para, según se van alcanzando ciertos umbrales de tasa de ocupación, hacerlo de una manera muy relevante (pequeños incrementos de tasa de ocupación llevan a grandes incrementos de la espera relativa).

De igual modo, para la misma tasa de ocupación, las esperas relativas son menores cuanto mayor es el número de atraques. Así, por ejemplo, si se impone en un puerto que la espera relativa (cociente entre el tiempo de espera y el tiempo de servicio) es de 0,50 (es decir que por cada día de operación del barco, éste tiene que esperar medio día en la cola para proceder al atraque), el grado de saturación (o intensidad de tráfico) que un puerto de 10 atraques puede permitir es cercano a 0,90 (práctica ocupación de sus muelles) mientras que un puerto con un único atraque es 0,33 (muelle con un grado de ocupación muy limitada). Este ejemplo se representa gráficamente en la ilustración 291.

Ilustración 291. Influencia del número de atraques en las esperas relativas y tasas de ocupación en un sistema M/M/n.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando las gráficas del número de barcos en cola (ilustración 292 e ilustración 293) se observa, como los mismos están en directa relación a la tasa de ocupación y al número de atraques disponibles; de tal manera que cuanto mayor sea cualquiera de estas variables anteriores (número de atraques o tasa de ocupación) mayor será el número medio de barcos en cola. Esto es coherente con la ecuación:

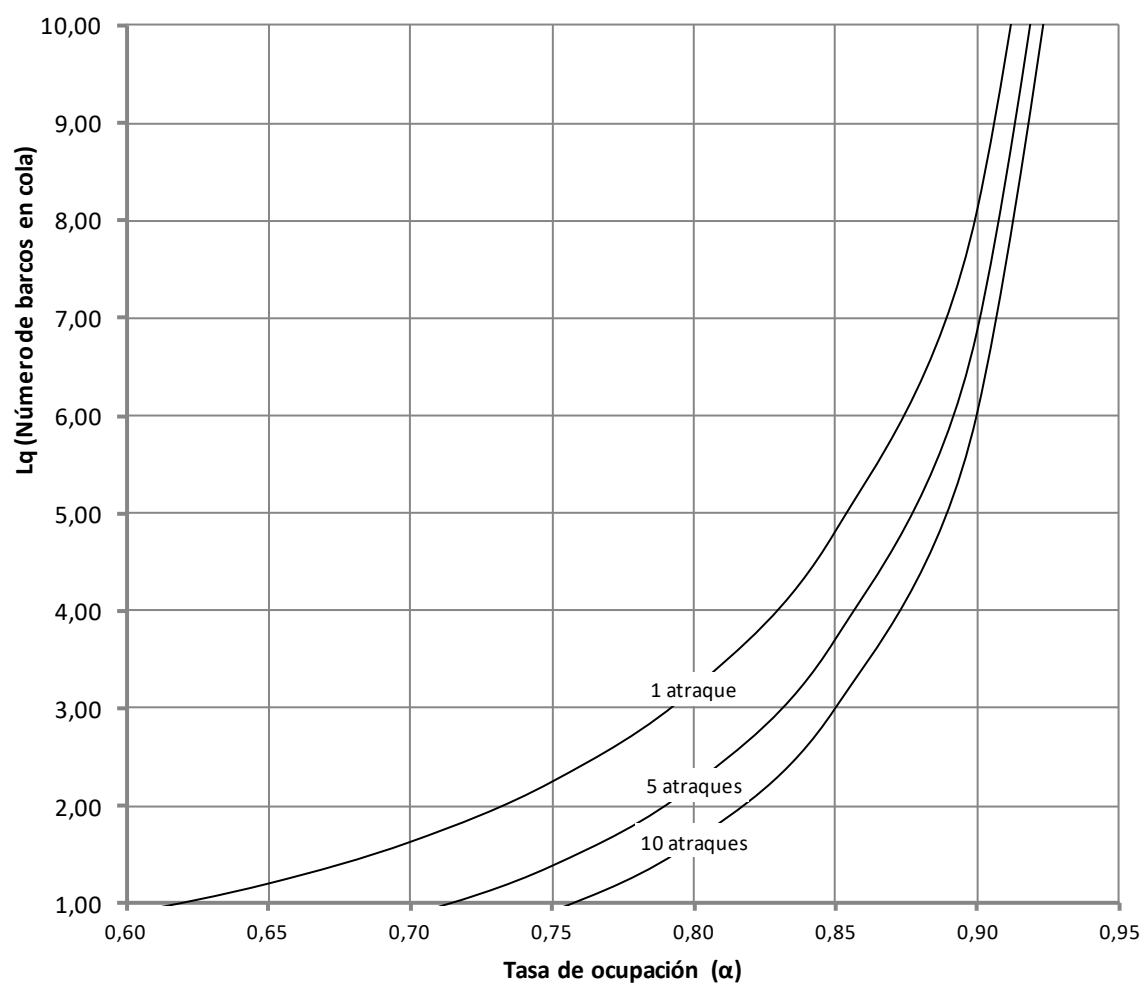
$$L_q = \lambda * W_q = \mu * \alpha * W_q = \eta * \alpha * N \quad (17)$$

Se observa, además, en estas ilustraciones que para tasas de ocupación inferiores al 60% (cualquiera que sea el número de atraques) el número medio de buques en espera será inferior a uno, y que sin embargo a partir de tasas de ocupación del 80% el número de barcos en cola

empieza a crecer de una manera acelerada, siendo las colas superiores a tres buques para cualquier número de atraques cuando el umbral supera el 85%.

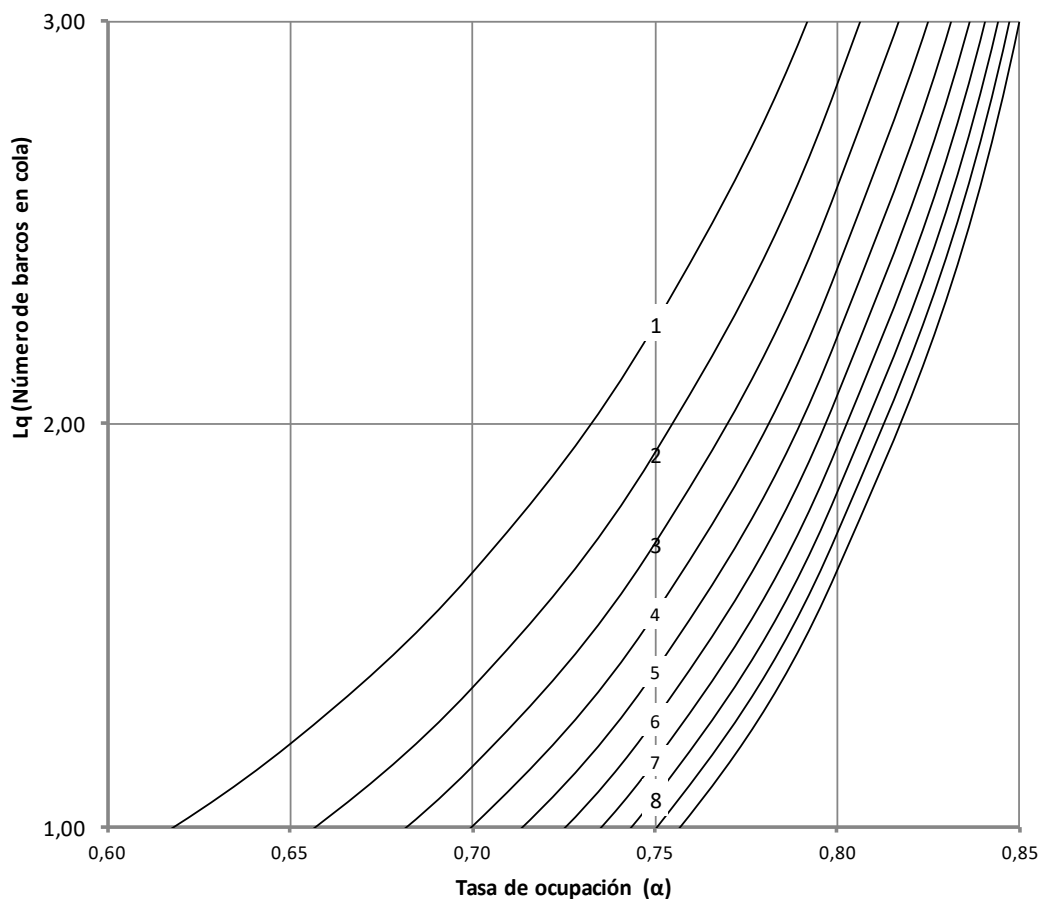
Esto ha llevado históricamente a definir óptimos de planificación en cuanto a las tasas de ocupación al intervalo 60-80%, siendo tanto más alta la tasa cuanto mayor es el número de atraques.

Ilustración 292. Número de barcos en cola (L_q) en un sistema M/M/n (entre rangos de ocupación 0.60 y 0.95).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 293. Número de barcos en cola (L_q) en un sistema M/M/n (entre rangos de ocupación 0.60 y 0.95).

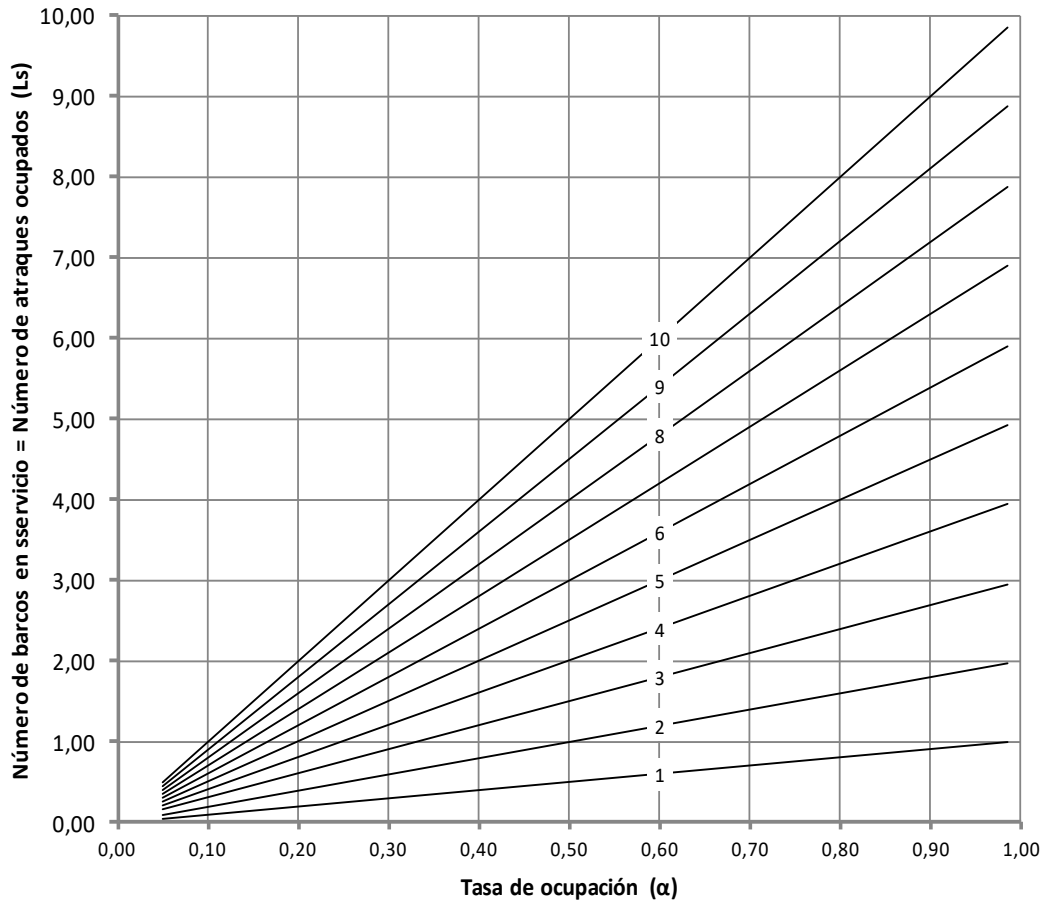


Fuente: Elaboración propia.

Analizando en el número de barcos medios en el sistema (o número de atraques usados) se aprecia que la relación es mucho más sencilla; siendo lineal con el número de atraques y la tasa de ocupación conforme se ponía de manifiesto en la expresión

$$L_s = \alpha * N = \lambda * N / \mu = \lambda * W_s \quad (16),$$

de tal manera que la gráfica se compone de líneas rectas que se hacen cero para tasas de ocupación cero ($\alpha=0$) y equivale al número de atraques (N) cuando la tasa de ocupación es uno ($\alpha=1$); es decir cuánto los muelles permanentemente ocupados (ilustración 294).

Ilustración 294. Número de barcos en servicio (L_s) en un sistema M/M/n .

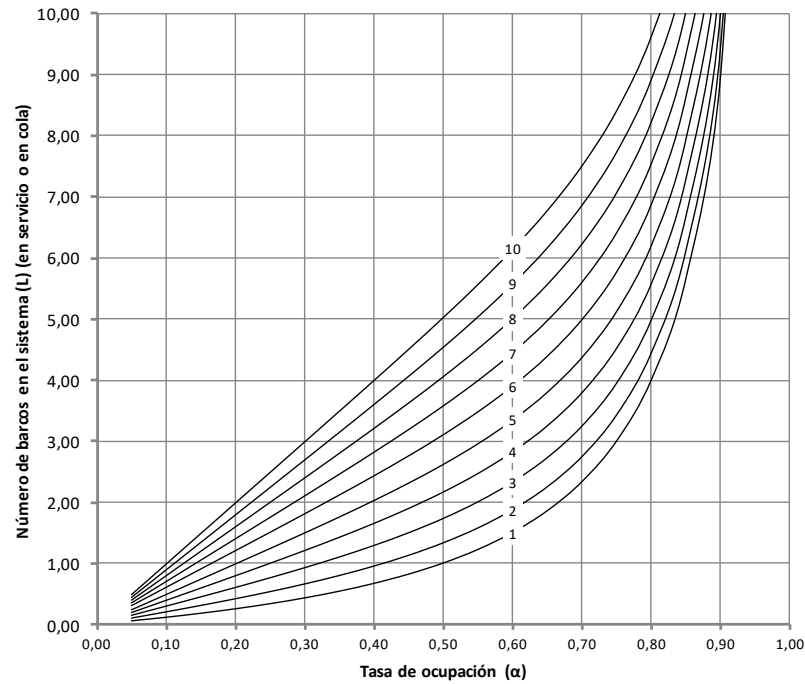
Fuente: Elaboración propia.

Las curvas correspondientes al número de barcos en el sistema corresponden a la suma de las dos gráficas anteriores, correspondiendo a la ecuación

$$L = L_q + L_s = \eta \cdot \alpha \cdot N + \alpha \cdot N = N * \alpha * (1 + \eta) = \lambda * W \quad (19)$$

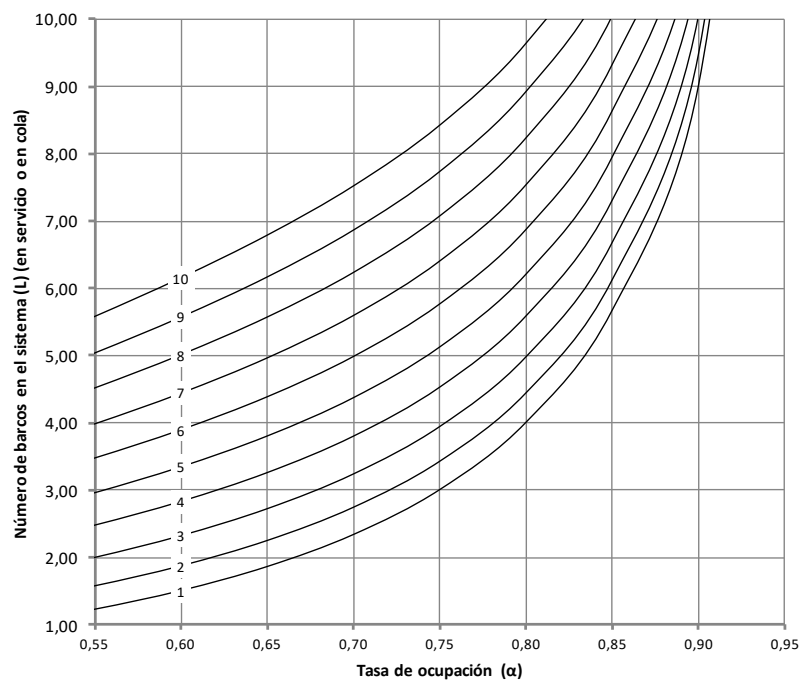
en el que existe una curva con una componente lineal (la correspondiente a L_s) y una con fuerte aceleración a partir de $\alpha=60\%$ (correspondiente a los buques en cola L_q)(ilustración 295 e ilustración 296).

Ilustración 295. Número de barcos en cola (L_q) en un sistema M/M/n (entre rangos de $\alpha = 0.60$ y 0.95).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 296. Número de barcos en sistema (L) en un sistema M/M/n (entre rangos de $\alpha = 0.60$ y 0.95).



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Sistemas M/G(z)/1 y G(γ)/M/1.

En la tabla 44 se representan las ecuaciones que adoptan las variables principales para los sistemas M/G(z)/1 y G(γ)/M/1; es decir, sistemas con un único ataque y con una de las dos funciones de distribución respondiendo a un sistema markoviano (aleatorio/exponencial); tal y como fueron expuestas por Rodríguez (1985).

Tabla 44. Soluciones a los sistemas de un ataque y una de las leyes markovianas (siendo la otra cualesquiera).

	Sistema M/G(z)/1 Ley de llegada exponencial y un ataque (para cualquier distribución de servicio)	Sistema G(γ)/M/1 Ley de servicio exponencial con un único ataque (para cualquier distribución en la ley de llegadas)
P ₀ Probabilidad de que un muelle este vacío	$P_0 = \frac{(1-\alpha)}{1-\alpha+Z\cdot\alpha} \quad (44)$	$\left(1 + \frac{2\cdot\gamma-1}{\alpha}P_0\right)(1-P_0)^{2\cdot\gamma-1} = 1 \quad (45)$
P _q Probabilidad de espera de un buque	$P_q = 1 - P_0 = \frac{Z\cdot\alpha}{1-\alpha+Z\cdot\alpha} \quad (46)$	$P_q = 1 - P_0 \quad (47)$
η Espera relativa	$\eta = \frac{Z\cdot\alpha}{1-\alpha} = P_q/P_0 \quad (48)$	$\eta = P_q/P_0 \quad (49)$
L _q Número de barcos en cola	$L_q = \eta \cdot \alpha = \frac{Z\cdot\alpha^2}{1-\alpha} \quad (50)$	$L_q = \eta \cdot \alpha \quad (51)$
L _s Número de barcos en servicio = Número de ataques ocupados	$L_s = \alpha \quad (52)$	$L_s = \alpha \quad (53)$
L Numero de barcos en el sistema (L _s +L _q)	$L = L_s + L_q = \alpha \cdot (1 + \eta) \quad (54)$	$L = L_s + L_q \quad (55)$

Fuente: Rodríguez (1985).

A continuación, y por su utilidad en el caso portuario, se particularizan las ecuaciones anteriores para sistemas con leyes de distribución E_k, como función de distribución en tiempos de llegadas G(z) o en tiempos de servicio G(γ).

4.1.3. Sistema M/E_k/1.

Para el caso de distribuciones Erlang de parámetro de fase k , se cumple que la función de distribución genérica $G(z)$ o Z como se ha denominado en las ecuaciones (44), (46), (48) y (50) se puede expresar en función de k de la siguiente manera:

$$G(z) = Z = \frac{1+k}{2k} \quad (56)$$

Por lo que es posible encontrar solución al sistema M/E_k/1 realizando la sustitución conforme la expresión anterior en las ecuaciones referidas en el párrafo anterior; resultando las siguientes expresiones:

$$\text{Frecuencia de llegada de buques } \lambda \quad (57)$$

$$\text{Intensidad de servicio por atraque: } \mu \quad (58)$$

$$\text{Utilización o grado de ocupación: } \alpha = \frac{\lambda}{\mu} \quad (59)$$

$$\text{Probabilidad de muelle vacío: } P_0 = \frac{1-\alpha}{1-\alpha+\frac{1+k}{2k}\alpha} \quad (60)$$

$$\text{Probabilidad de espera de buque: } P_q = 1 - P_0 = \frac{\frac{1+k}{2k}\alpha}{1-\alpha+\frac{1+k}{2k}\alpha} \quad (61)$$

$$\text{Espera Relativa: } \eta = \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (62)$$

$$\text{Tiempo medio de espera en cola: } W_q = \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} = \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\alpha \cdot \mu^{-1}}{1-\alpha} \quad (63)$$

$$\text{Tiempo medio en el sistema: } W = W_q + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu} + \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} = \mu^{-1} + \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\alpha \cdot \mu^{-1}}{1-\alpha} \quad (64)$$

$$\text{Número medio de buques en sistema: } L_s = \lambda W_s = \alpha \quad (65)$$

$$\text{Número medio de buques en cola: } L_q = \lambda_q W_q = \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\lambda^2}{\mu(\mu-\lambda)} = \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \quad (66)$$

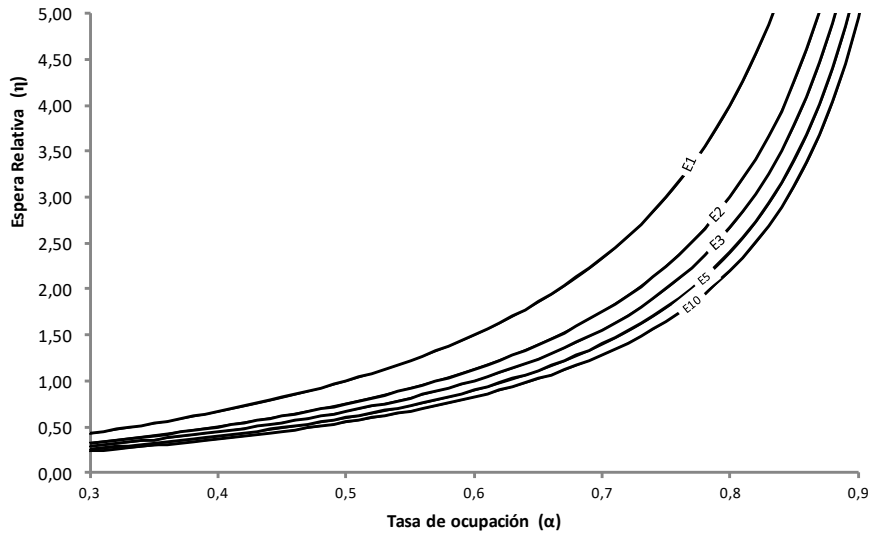
$$\text{Número medio buques sistema: } L = \lambda W = \alpha + L_q = \frac{\lambda}{\mu} + \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\lambda^2}{\mu(\mu-\lambda)} = \alpha + \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \quad (67)$$

Los resultados de espera relativa para este sistema se recogen en la tabla 45, mientras que sus correspondientes gráficas en función de la tasa de ocupación se representan en la ilustración 297.

Tabla 45. Esperanza relativa en sistemas M/E_k/1.

<p style="text-align: center;">Espera relativa $\eta = \frac{1+k}{2k} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha}$</p> <p style="text-align: center;">Sistemas M/E_k/1</p>															
Ocupación (α)	K = 1	K = 2	K = 3	K = 4	K = 5	K = 6	K = 7	K = 8	K = 9	K = 10	K = 11	K = 12	K = 13	K = 14	K = 15
0,1	0,111	0,083	0,074	0,069	0,067	0,065	0,063	0,063	0,062	0,061	0,061	0,060	0,060	0,060	0,059
0,15	0,176	0,132	0,118	0,110	0,106	0,103	0,101	0,099	0,098	0,097	0,096	0,096	0,095	0,095	0,094
0,2	0,250	0,188	0,167	0,156	0,150	0,146	0,143	0,141	0,139	0,138	0,136	0,135	0,135	0,134	0,133
0,25	0,333	0,250	0,222	0,208	0,200	0,194	0,190	0,188	0,185	0,183	0,182	0,181	0,179	0,179	0,178
0,3	0,429	0,321	0,286	0,268	0,257	0,250	0,245	0,241	0,238	0,236	0,234	0,232	0,231	0,230	0,229
0,35	0,538	0,404	0,359	0,337	0,323	0,314	0,308	0,303	0,299	0,296	0,294	0,292	0,290	0,288	0,287
0,4	0,667	0,500	0,444	0,417	0,400	0,389	0,381	0,375	0,370	0,367	0,364	0,361	0,359	0,357	0,356
0,45	0,818	0,614	0,545	0,511	0,491	0,477	0,468	0,460	0,455	0,450	0,446	0,443	0,441	0,438	0,436
0,5	1,000	0,750	0,667	0,625	0,600	0,583	0,571	0,563	0,556	0,550	0,545	0,542	0,538	0,536	0,533
0,55	1,222	0,917	0,815	0,764	0,733	0,713	0,698	0,688	0,679	0,672	0,667	0,662	0,658	0,655	0,652
0,6	1,500	1,125	1,000	0,938	0,900	0,875	0,857	0,844	0,833	0,825	0,818	0,813	0,808	0,804	0,800
0,65	1,857	1,393	1,238	1,161	1,114	1,083	1,061	1,045	1,032	1,021	1,013	1,006	1,000	0,995	0,990
0,7	2,333	1,750	1,556	1,458	1,400	1,361	1,333	1,313	1,296	1,283	1,273	1,264	1,256	1,250	1,244
0,75	3,000	2,250	2,000	1,875	1,800	1,750	1,714	1,688	1,667	1,650	1,636	1,625	1,615	1,607	1,600
0,8	4,000	3,000	2,667	2,500	2,400	2,333	2,286	2,250	2,222	2,200	2,182	2,167	2,154	2,143	2,133
0,85	5,667	4,250	3,778	3,542	3,400	3,306	3,238	3,188	3,148	3,117	3,091	3,069	3,051	3,036	3,022
0,9	9,000	6,750	6,000	5,625	5,400	5,250	5,143	5,063	5,000	4,950	4,909	4,875	4,846	4,821	4,800
0,95	19,00	14,250	12,667	11,875	11,400	11,083	10,857	10,688	10,556	10,450	10,364	10,292	10,231	10,179	10,133
0,98	49,00	36,750	32,667	30,625	29,400	28,583	28,000	27,563	27,222	26,950	26,727	26,542	26,385	26,250	26,133

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 297. Espera relativa en sistemas M/E_k/1.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso se pone de manifiesto que conforme se va aumentando el factor k de la función de distribución Erlang de tiempos de servicio (conceptualmente lleva a mayor regularidad en el servicio hasta el punto en el que $K=\infty$) las esperas relativas van disminuyendo, obteniéndose además las siguientes relaciones:

- $\eta(M/E_2/1) / \eta(M/E_1/1) = 75\%$
- $\eta(M/E_3/1) / \eta(M/E_1/1) = 66.7\%$
- $\eta(M/E_4/1) / \eta(M/E_1/1) = 62.5\%$
- $\eta(M/E_5/1) / \eta(M/E_1/1) = 60.0\%$

Esta relación va descendiendo hasta que en el límite se hace el 50%. En efecto

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\eta_{(E_k)}}{\eta_{(E_1)}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\frac{1+k}{2K} \frac{\alpha}{1-\alpha}}{\frac{\alpha}{1-\alpha}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1+k}{2 \cdot K} = 0,5 \quad (68)$$

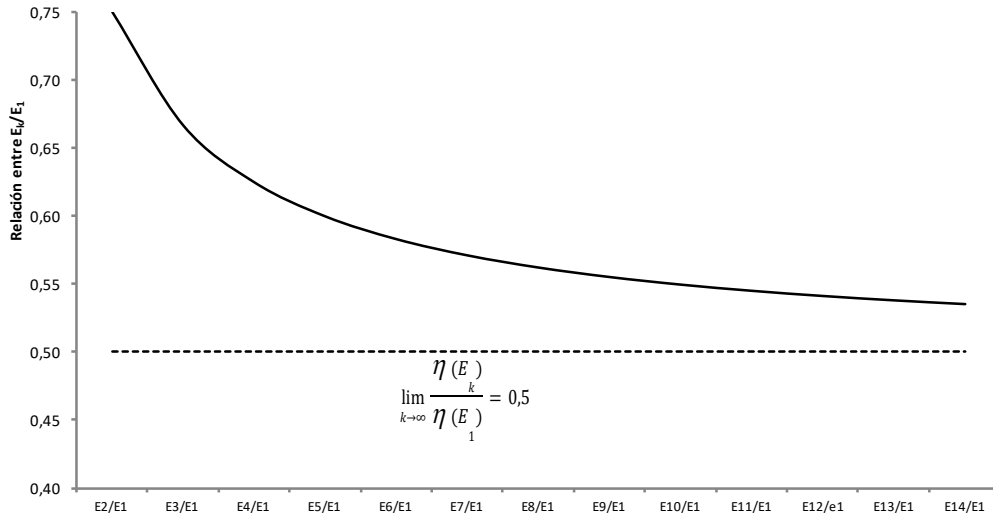
- $\eta(M/E_{\infty}/1) / \eta(M/E_1/1) = 50\%$

Es decir las esperas relativas con tiempos de servicio constantes son la mitad de las esperables con tiempos de servicio exponenciales.

La variación de la relación entre esperas relativas de un sistema M/E_k/1 con otro M/M/1 ($E_k=1$) se observa en la ilustración 298, donde se advierte, efectivamente, como la misma va

descendiendo desde un máximo de 0,75 cuando se compara el sistema M/E₂/1 con el M/M/1 (E_k=1) hasta 0,5 cuando se compara el M/D/N (E_k=∞) con el M/M/1(E_k=1).

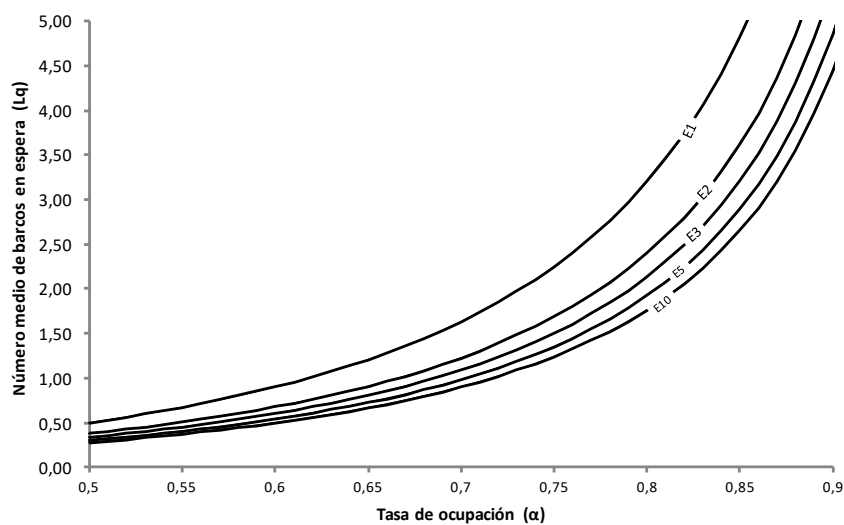
Ilustración 298. Relación esperas relativas en un sistema M/E_k/1.



Fuente: Elaboración propia.

Si se analiza un parámetro más intuitivo como es el de número medio de barcos en cola (L_q), se observa (en media), que no hay más de un barco en cola hasta que se superan las tasas de ocupación del 60%, siendo tanto menor la longitud de la cola de barcos a ser atendidos cuanto mayor es el orden k de la distribución Erlang con la que se realice el ajuste (ilustración 299).

Ilustración 299. Número medio de marcos en cola (L_q) en un sistema M/E_k/1.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46. Número medio de barcos en cola (L_q) en sistemas M/E_k/1.

Espera relativa $\eta = \frac{1+k}{2k} \frac{\alpha}{1-\alpha}$ Sistemas M/E_k/1															
Ocupación (α)	K = 1	K = 2	K = 3	K = 4	K = 5	K = 6	K = 7	K = 8	K = 9	K = 10	K = 11	K = 12	K = 13	K = 14	K = 15
0,1	0,111	0,083	0,074	0,069	0,067	0,065	0,063	0,063	0,062	0,061	0,061	0,060	0,060	0,060	0,059
0,15	0,176	0,132	0,118	0,110	0,106	0,103	0,101	0,099	0,098	0,097	0,096	0,096	0,095	0,095	0,094
0,2	0,250	0,188	0,167	0,156	0,150	0,146	0,143	0,141	0,139	0,138	0,136	0,135	0,135	0,134	0,133
0,25	0,333	0,250	0,222	0,208	0,200	0,194	0,190	0,188	0,185	0,183	0,182	0,181	0,179	0,179	0,178
0,3	0,429	0,321	0,286	0,268	0,257	0,250	0,245	0,241	0,238	0,236	0,234	0,232	0,231	0,230	0,229
0,35	0,538	0,404	0,359	0,337	0,323	0,314	0,308	0,303	0,299	0,296	0,294	0,292	0,290	0,288	0,287
0,4	0,667	0,500	0,444	0,417	0,400	0,389	0,381	0,375	0,370	0,367	0,364	0,361	0,359	0,357	0,356
0,45	0,818	0,614	0,545	0,511	0,491	0,477	0,468	0,460	0,455	0,450	0,446	0,443	0,441	0,438	0,436
0,5	1,000	0,750	0,667	0,625	0,600	0,583	0,571	0,563	0,556	0,550	0,545	0,542	0,538	0,536	0,533
0,55	1,222	0,917	0,815	0,764	0,733	0,713	0,698	0,688	0,679	0,672	0,667	0,662	0,658	0,655	0,652
0,6	1,500	1,125	1,000	0,938	0,900	0,875	0,857	0,844	0,833	0,825	0,818	0,813	0,808	0,804	0,800
0,65	1,857	1,393	1,238	1,161	1,114	1,083	1,061	1,045	1,032	1,021	1,013	1,006	1,000	0,995	0,990
0,7	2,333	1,750	1,556	1,458	1,400	1,361	1,333	1,313	1,296	1,283	1,273	1,264	1,256	1,250	1,244
0,75	3,000	2,250	2,000	1,875	1,800	1,750	1,714	1,688	1,667	1,650	1,636	1,625	1,615	1,607	1,600
0,8	4,000	3,000	2,667	2,500	2,400	2,333	2,286	2,250	2,222	2,200	2,182	2,167	2,154	2,143	2,133
0,85	5,667	4,250	3,778	3,542	3,400	3,306	3,238	3,188	3,148	3,117	3,091	3,069	3,051	3,036	3,022
0,9	9,000	6,750	6,000	5,625	5,400	5,250	5,143	5,063	5,000	4,950	4,909	4,875	4,846	4,821	4,800
0,95	19,00	14,250	12,667	11,875	11,400	11,083	10,857	10,688	10,556	10,450	10,364	10,292	10,231	10,179	10,133
0,98	49,00	36,750	32,667	30,625	29,400	28,583	28,000	27,563	27,222	26,950	26,727	26,542	26,385	26,250	26,133

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Sistema M/D/1.

Para el caso concreto de un único atraque, ley de llegada Poisson y ley de servicio constante (M/D/1), se pueden obtener las ecuaciones representativas al sustituir el valor $Z = \frac{1}{2}$ en las ecuaciones anteriores (ecuación (44) a (54) correspondientes al caso genérico M/G(z)/1 tal y como ha quedado demostrado a través de la ecuación (69).

Con esto se obtiene:

$$\text{Frecuencia de llegada de buques a puerto: } \lambda \quad (70)$$

$$\text{Intensidad de servicio por atraque: } \mu \quad (71)$$

$$\text{Utilización o grado de ocupación: } \alpha = \frac{\lambda}{\mu} \quad (72)$$

$$\text{Probabilidad de muelle vacío: } P_0 = 2 \cdot \frac{1-\alpha}{2-\alpha} \quad (73)$$

$$\text{Probabilidad de espera de un buque: } P_q = \frac{\alpha}{2-\alpha} \quad (74)$$

$$\text{Espera relativa: } \eta = \mu W_q = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (75)$$

$$\text{Número medio de buques en cola: } L_q = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{\mu(\mu-\lambda)} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \quad (76)$$

$$\text{Número de barcos en servicio: } L_s = \alpha \quad (77)$$

$$\text{Número medio buques en sistema: } L = \alpha + L_q = \frac{\lambda}{\mu} + \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{\mu(\mu-\lambda)} = \alpha + \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \quad (78)$$

$$\text{Tiempo medio de espera en la cola: } W_q = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} = \frac{1}{2} \frac{\alpha \cdot \mu^{-1}}{1-\alpha} = \frac{1}{2 \cdot \mu} \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (79)$$

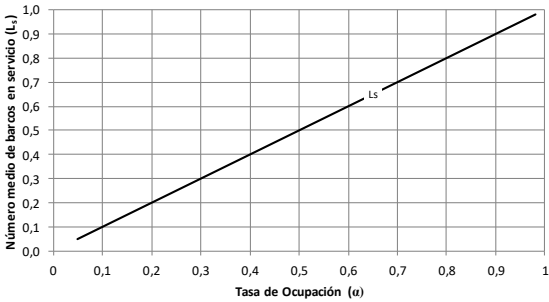
$$\text{Tiempo medio en el sistema: } W = \mu^{-1} + W_q = \frac{1}{\mu} + \frac{1}{2 \mu} \frac{\lambda}{\mu-\lambda} = \frac{1}{2 \mu} \frac{2-\alpha}{1-\alpha} \quad (80)$$

Para este caso se incluye, de igual modo, la tabla 47 con los valores en función de la tasa de ocupación. A su vez, se incorporan los gráficos que permiten la visualización de cómo se comporta este sistema (ilustración 300 a ilustración 303):

Tabla 47. Variables representativas en un sistema M/D/1 (llegadas aleatorias, servicio constante y 1 atraque).

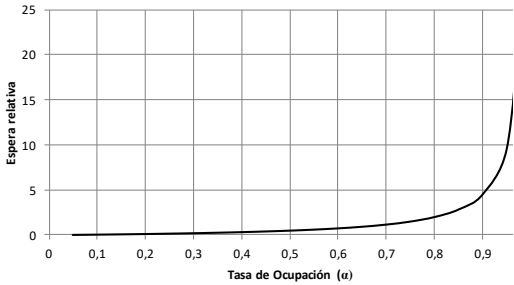
Sistema M/D/1						
α	P_0	P_q	η	L_q	L_s	L
0,05	0,974	0,026	0,026	0	0	0
0,10	0,947	0,053	0,056	0	0	0
0,15	0,919	0,081	0,088	0	0	0
0,20	0,889	0,111	0,125	0	0	0
0,25	0,857	0,143	0,167	0	0	0
0,30	0,824	0,176	0,214	0	0	0
0,35	0,788	0,212	0,269	0	0	0
0,40	0,750	0,250	0,333	0	0	1
0,45	0,710	0,290	0,409	0	0	1
0,50	0,667	0,333	0,500	0	1	1
0,55	0,621	0,379	0,611	0	1	1
0,60	0,571	0,429	0,750	0	1	1
0,65	0,519	0,481	0,929	1	1	1
0,70	0,462	0,538	1,167	1	1	2
0,75	0,400	0,600	1,500	1	1	2
0,80	0,333	0,667	2,000	2	1	2
0,85	0,261	0,739	2,833	2	1	3
0,90	0,182	0,818	4,500	4	1	5
0,95	0,095	0,905	9,500	9	1	10
0,98	0,039	0,961	24,500	24	1	25

Ilustración 300. Número de barcos en servicio (L_s) en un sistema M/D/1.



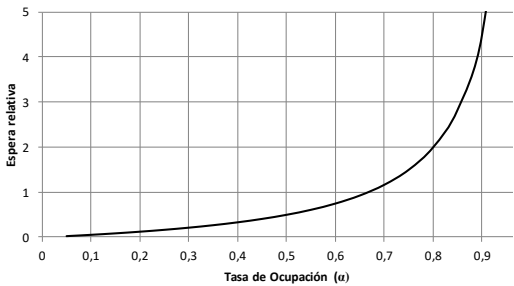
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 301. Espera relativa en un sistema M/D/1. (Rango $\eta = 0-25$) (escala decimal).



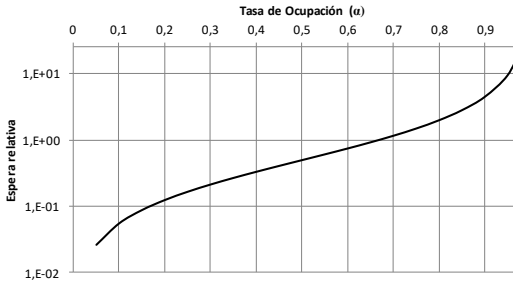
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 302. Espera relativa en un sistema M/D/1 (Rango $\eta = 0-5$) (escala decimal).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 303. Espera relativa en un sistema M/D/1. (Escala exponencial).



Fuente: Elaboración propia.

La interpretación de las gráficas anteriores es idéntica conceptualmente a las que se ha repasado en apartados previos. La espera relativa va creciendo conforme lo va haciendo la tasa de ocupación, primero de una manera muy lenta (no se alcanzan esperas relativas superiores a 1 hasta que no se llega a una tasa del 70%) para después comenzar a incrementarse de una manera muy significativa (valores de 2 con tasas del 80% y de 4'5 con el 90% o 9'5 con 95%), efecto que se observa numéricamente en la tabla 47 y gráficamente en la Ilustración 301.

Para facilitar la visualización para tasas de ocupación bajas, se incluyen además unas gráficas donde se registra la escala del eje de ordenadas hasta tasas relativas de 5 (ilustración 302) o representándola directamente en una escala logarítmica (ilustración 303).

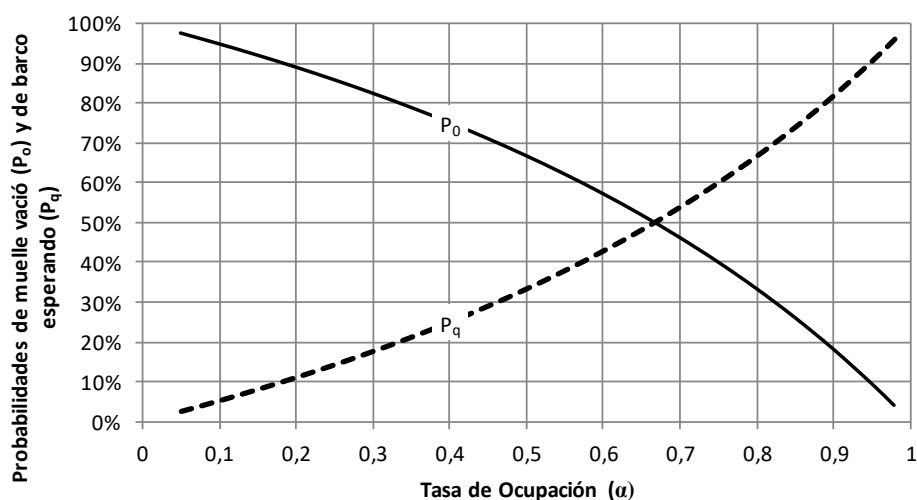
La interpretación de la gráfica de barcos medios en servicio (L_s) es muy sencilla, puesto que como se ha determinado en la ecuación

$$\text{Número de barcos en servicio:} \quad L_s = \alpha \quad (77)$$

el número de barcos coincide con la tasa de ocupación y por tanto es nula cuando no hay tráfico ($\alpha=0$) y uno en el hipotético caso de que el muelle estuviera permanentemente ocupado ($\alpha=1$).

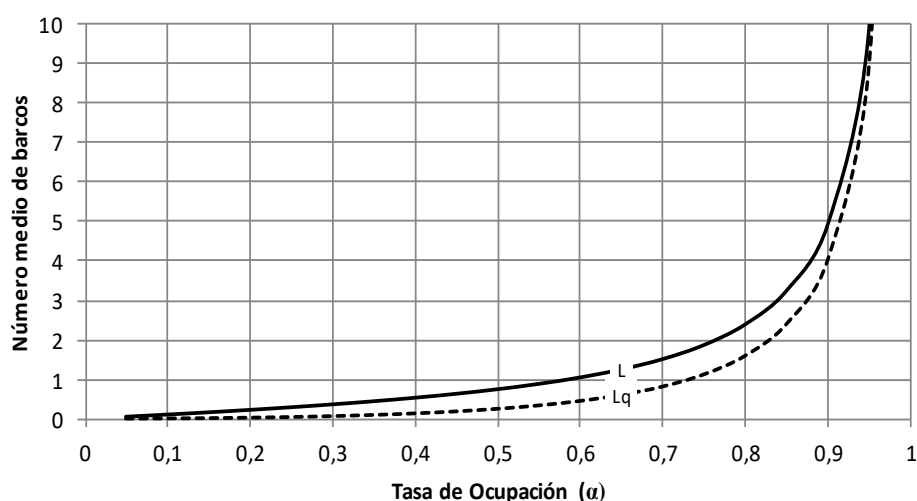
La probabilidad de encontrar el muelle vacío (P_0) y la probabilidad de espera de un barco (P_q) quedan representadas conjuntamente en la ilustración 304, de la que se aprende que la probabilidad de muelle vacío es el 100% en ausencia de tráfico ($\alpha=0$) y va decreciendo de una manera acelerada hasta alcanzar el valor del 0% con muelles permanentemente ocupados ($\alpha=1$).

Efecto inverso pasa en la probabilidad de espera de un barco que es nula con $\alpha=0$ y del 100% con $\alpha=1$ (muelles totalmente ocupados).

Ilustración 304. Probabilidad de buque es espera (P_q) y muelle vacío (P_0) en un sistema M/D/1.

Fuente: Elaboración propia.

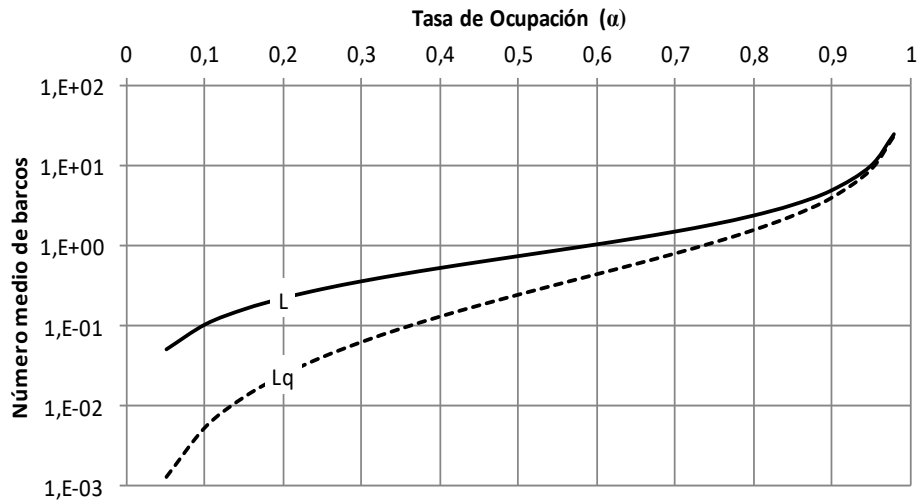
En la ilustración 305 se representa la variación con la tasa de ocupación del número medio de barcos en cola (L_q) y el número medio de barcos en sistema (L). En este caso se vuelve a obtener los mismos resultados que anteriormente con un lento crecimiento de los mismos hasta el 70% de tasa de ocupación (número medio de buques en cola inferior a 1) para crecer muy rápidamente hasta el 80% (aproximadamente 2) y todavía más al 90% (en torno a 4), siendo muy inestable el sistema con tasas del 95% (colas medias superiores a 10 barcos en un sistema con un único atraque).

Ilustración 305. Número de barcos en cola (N_q) y en sistema (N_s) en un sistema M/D/1 (escala decimal).

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente para favorecer la utilización como ábaco de este caso, se ha representado la misma gráfica en escala logarítmica (ilustración 306).

Ilustración 306. Número de barcos en cola (N_q) y en sistema (N_s) en un sistema M/D/1 (escala exponencial).



Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Sistemas Ek/M/1.

La resolución de estos sistemas requiere, aun siendo soluciones exactas, mucho más esfuerzo matemático, puesto que como se ha puesto de manifiesto, no es posible despejar de una manera automática la ecuación (45) que requiere una resolución mediante procedimientos de tanteos y/o aproximaciones sucesivas.

Para planteamientos teóricos se puede consultar la soluciones calculadas por Rodríguez (1985) que presentaba una tabla de esperas relativas en función de distintos valores de γ entre 0,5 y 1,0 a intervalos crecientes con incrementos $\Delta=+0,05$ y con una precisión al tercer decimal, pero que no corresponden más que en casos determinados a funciones Erlang de un número entero ($\gamma=1$ a sistema M/M/1; $\gamma=0,75$ a sistema $E_2/M/1$; $\gamma=0,60$ a sistema $E_5/M/1$; $\gamma=0,55$ a sistema $E_{10}/M/1$ y $\gamma=0,50$ a sistema D/M/1).

Mientras que es verdad que los sistemas citados en el párrafo anterior cubren la mayoría de los casos prácticos citados en la tabla 35, también es cierto que en el proceso de verificación se han detectado algunos errores tipográficos y de redondeo en las colas (a tasas de ocupación altas y bajas) por los que conviene reformularlos.

En tal sentido y con objeto de permitir aplicación práctica a otros sistemas ($E_3/M/1$ y $E_4/M/1$) no incluidos por Rodríguez (1985) se adjunta una tabla de elaboración propia tanto para la probabilidad de encontrar el muelle vacío (P_0) (tabla 48) como de espera relativa (η) (tabla 49) que han sido calculados por este autor en el marco de esta tesis mediante el procedimiento de tanteos y con un grado de precisión al quinto decimal.

Tabla 48. Probabilidad de muelle vacío (P_0). Sistemas $E_k/M/1$.

		Probabilidad de muelle vacío (P_0) Sistema $E_k/M/1$						
γ		1	0,75	0,6667	0,625	0,6	0,55	0,5
K-Erlang		1	2	3	4	5	10	∞
Sistema		M/M/1	E2/M/1	E3/M/1	E4/M/1	E5/M/1	E10/M/1	D/M/1
Tasa de Ocupación (α)	0,05	0,95000	0,99161	0,99777	0,99923	0,99968	0,99998	1,00000
	0,10	0,90000	0,97082	0,98734	0,99321	0,99583	0,99902	0,99995
	0,15	0,85000	0,94162	0,96804	0,97916	0,98490	0,99380	0,99872
	0,20	0,80000	0,90623	0,94097	0,95702	0,96595	0,98156	0,99302
	0,25	0,75000	0,86603	0,90733	0,92756	0,93933	0,96137	0,98017
	0,30	0,70000	0,82196	0,86812	0,89167	0,90577	0,93339	0,95911
	0,35	0,65000	0,77468	0,82414	0,85014	0,86604	0,89815	0,92982
	0,40	0,60000	0,72470	0,77605	0,80368	0,82084	0,85627	0,89265
	0,45	0,55000	0,67238	0,72435	0,75282	0,77072	0,80834	0,84815
	0,50	0,50000	0,61803	0,66947	0,69806	0,71622	0,75492	0,79680
	0,55	0,45000	0,56189	0,61173	0,63980	0,65776	0,69648	0,73920
	0,60	0,40000	0,50416	0,55145	0,57836	0,59573	0,63347	0,67580
	0,65	0,35000	0,44500	0,48885	0,51403	0,53042	0,56625	0,60690
	0,70	0,30000	0,38454	0,42414	0,44711	0,46209	0,49505	0,53300
	0,75	0,25000	0,32289	0,35753	0,37771	0,39093	0,42034	0,45450
	0,80	0,20000	0,26015	0,28903	0,30609	0,31716	0,34211	0,37150
	0,85	0,15000	0,19643	0,21906	0,23229	0,24114	0,26096	0,28400
	0,90	0,10000	0,13175	0,14728	0,15674	0,16281	0,17668	0,19300
	0,95	0,05000	0,06631	0,07463	0,07937	0,08237	0,08968	0,09300

Fuente: Elaboración propia.

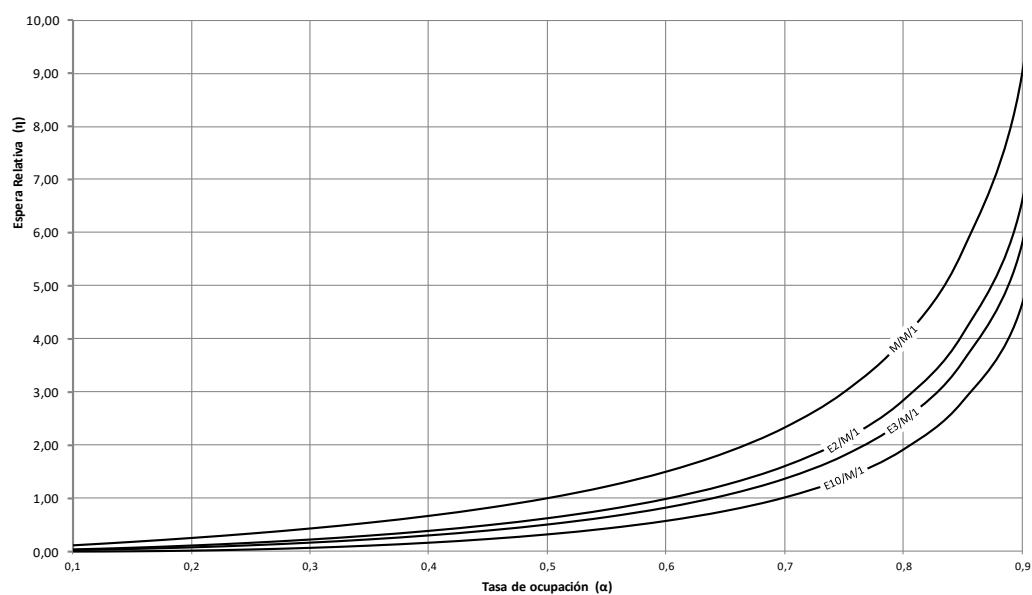
Tabla 49. Espera relativa (η). Sistemas $E_k/M/1$.

		Espera Relativa (η) Sistema $E_k/M/1$						
γ		1	0,75	0,6667	0,625	0,6	0,55	0,5
K-Erlang		1	2	3	4	5	10	∞
Sistema		M/M/1	E2/M/1	E3/M/1	E4/M/1	E5/M/1	E10/M/1	D/M/1
Tasa de Ocupación (α)	0,05	0,05263	0,00846	0,00224	0,00077	0,00032	0,00002	2,00E-09
	0,1	0,11111	0,03006	0,01282	0,00684	0,00419	0,00098	0,00005
	0,15	0,17647	0,06200	0,03301	0,02128	0,01533	0,00624	0,00129
	0,2	0,25000	0,10348	0,06273	0,04491	0,03525	0,01879	0,00702
	0,25	0,33333	0,15470	0,10214	0,07810	0,06459	0,04018	0,02023
	0,3	0,42857	0,21661	0,15192	0,12149	0,10403	0,07136	0,04263
	0,35	0,53846	0,29086	0,21338	0,17627	0,15468	0,11340	0,07548
	0,4	0,66667	0,37989	0,28858	0,24428	0,21827	0,16786	0,12026
	0,45	0,81818	0,48725	0,38055	0,32834	0,29749	0,23710	0,17904
	0,5	1,00000	0,61805	0,49371	0,43254	0,39621	0,32465	0,25502
	0,55	1,22222	0,77970	0,63470	0,56300	0,52030	0,43580	0,35281
	0,6	1,50000	0,98350	0,81340	0,72903	0,67860	0,57860	0,47973
	0,65	1,85714	1,24720	1,04560	0,94540	0,88530	0,76600	0,64772
	0,7	2,33333	1,60050	1,35770	1,23660	1,16410	1,02000	0,87617
	0,75	3,00000	2,09700	1,79700	1,64750	1,55800	1,37900	1,20022
	0,8	4,00000	2,84400	2,45990	2,26700	2,15300	1,92300	1,69179
	0,85	5,66667	4,09100	3,56500	3,30500	3,14700	2,83200	2,52113
	0,9	9,00000	6,59000	5,79000	5,38000	5,14200	4,66000	4,18135
	0,95	19,00000	14,08100	12,40000	11,60000	11,14100	10,15100	9,75269

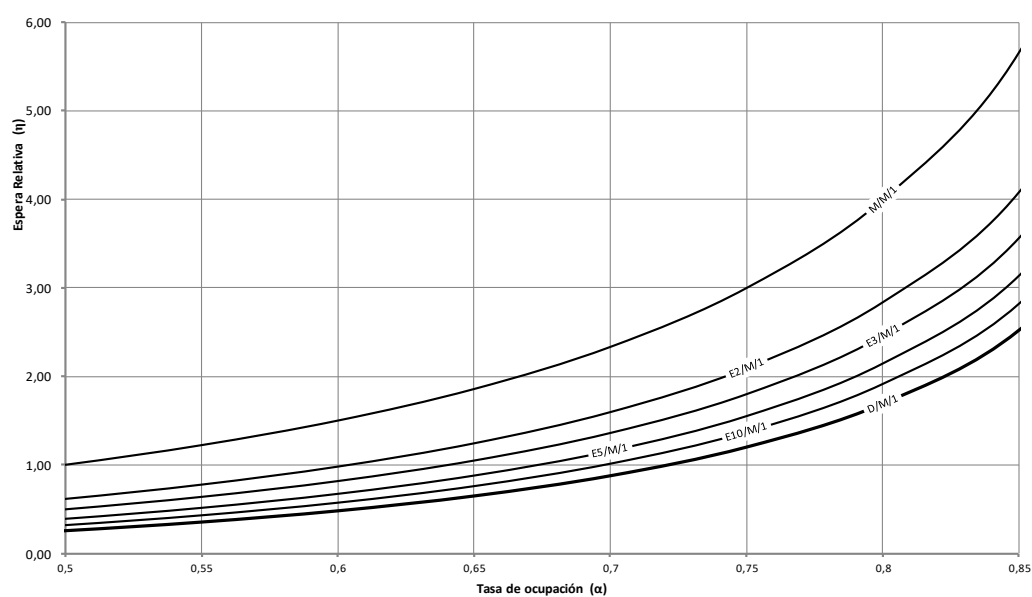
Fuente: Elaboración propia.

La espera relativa queda representada para todo un rango amplio de tasas de ocupación estudiado (0,1-0,90) en la ilustración 307 y además se ha añadido una gráfica limitando las ordenadas a rangos habituales en ejercicios de planificación portuaria (0,5-0,85) que permiten la lectura de los datos de una manera gráfica más sencilla (ilustración 308).

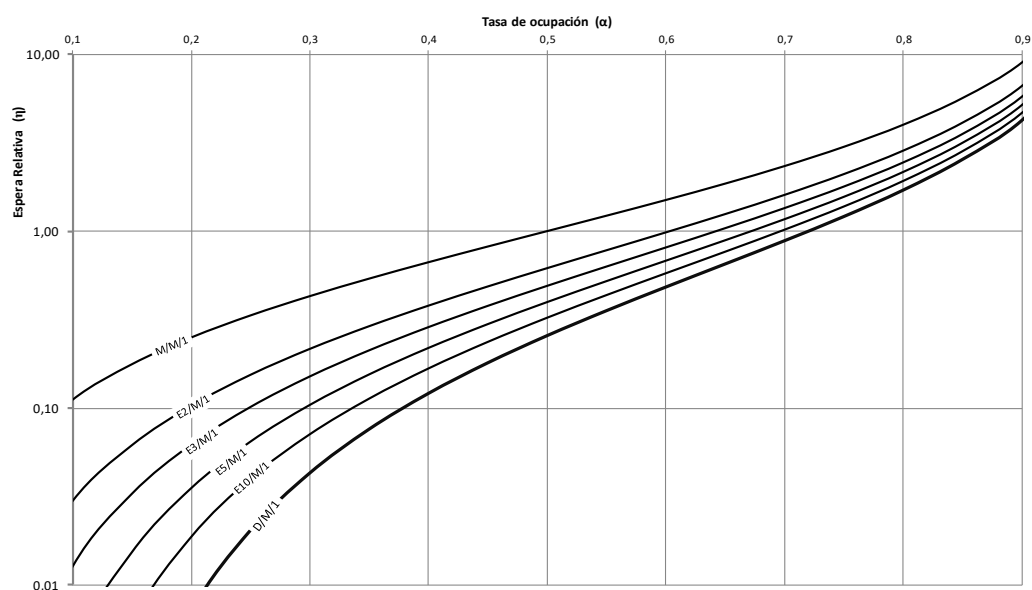
Al margen y para permitir su visualización en rangos de tasas de ocupación bajas se ha incorporado una nueva gráfica, esta vez con el eje de ordenadas en escala logarítmica (ilustración 309),

Ilustración 307. Espera relativa en un sistema $E_k/M/1$ (escala decimal) (Rango $\alpha = 0,1-0,9$).

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 308. Espera relativa en un sistema $E_k/M/1$ (escala decimal) (Rango $\alpha = 0,5-0,85$).

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 309. Espera relativa en un sistema $E_k/M/1$ (escala exponencial).

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la espera media; para la obtención de otros parámetros (como el número medio de buques) basta con utilizar las ecuaciones (51), (53) y (55):

$$L_q = \eta \cdot \alpha \quad (51)$$

$$L_s = \alpha \quad (53)$$

$$L = L_s + L_q \quad (55)$$

Y para la obtención de los tiempos en cola, servicio o en sistema, conocida la frecuencia de llegada (λ) o el nivel de servicio (μ) basta con utilizar las ecuaciones genéricas:

$$\alpha = \lambda / \mu \quad (14)$$

$$L = \lambda * W \quad (20)$$

$$L_s = \lambda * W_s \quad (21)$$

$$L_q = \lambda * W_q \quad (22)$$

4.1.6. Sistema D/M/1.

Para el caso concreto de un único atraque, ley de llegada Poisson y ley de servicio constante (D/M/1), se dispone de las siguientes ecuaciones representativas, que resultan de sustituir el valor $\gamma = 1/2$ en las ecuaciones anteriores (ecuaciones (45) a (55)) correspondientes al caso genérico $G(\gamma)/M/1$ para cualquier distribución de tiempos entre-llegadas):

$$\text{Frecuencia de llegada de buques a puerto} \quad \lambda \quad (81)$$

$$\text{Intensidad de servicio por atraque} \quad \mu \quad (82)$$

$$\text{Utilización o grado de ocupación:} \quad \alpha = \frac{\lambda}{\mu} \quad (83)$$

$$\text{Probabilidad de muelle vacío} \quad (1 - P_0)^\alpha \cdot e^{P_0} = 1 \quad (84)$$

Nótese que en el caso de llegadas constantes ($\gamma = 0,5$) la ecuación (45) queda indeterminada. Para su resolución se toman logaritmos pasando posteriormente al límite para resolverlas.

$$\text{Probabilidad de espera de un buque} \quad P_q = 1 - P_0 \quad (85)$$

$$\text{Espera relativa:} \quad \eta = P_q / P_0 \quad (86)$$

$$\text{Número medio de barcos en cola:} \quad L_q = \eta \cdot \alpha \quad (87)$$

$$\text{Número de barcos en servicio} \quad L_s = \alpha \quad (88)$$

$$\text{Número de barcos en el sistema:} \quad L = L_s + L_q = \alpha(1 + \eta) \quad (89)$$

$$\text{Tiempo medio de espera:} \quad W_q = L_q / \lambda = \eta \cdot \alpha / \lambda = \alpha / \mu \quad (90)$$

$$\text{Tiempo medio en servicio:} \quad W_s = L_s / \lambda = \alpha / \lambda = 1 / \mu \quad (91)$$

$$\text{Tiempo medio en el sistema:} \quad W = L / \lambda = \alpha(1 + \eta) / \lambda = (1 + \eta) / \mu \quad (92)$$

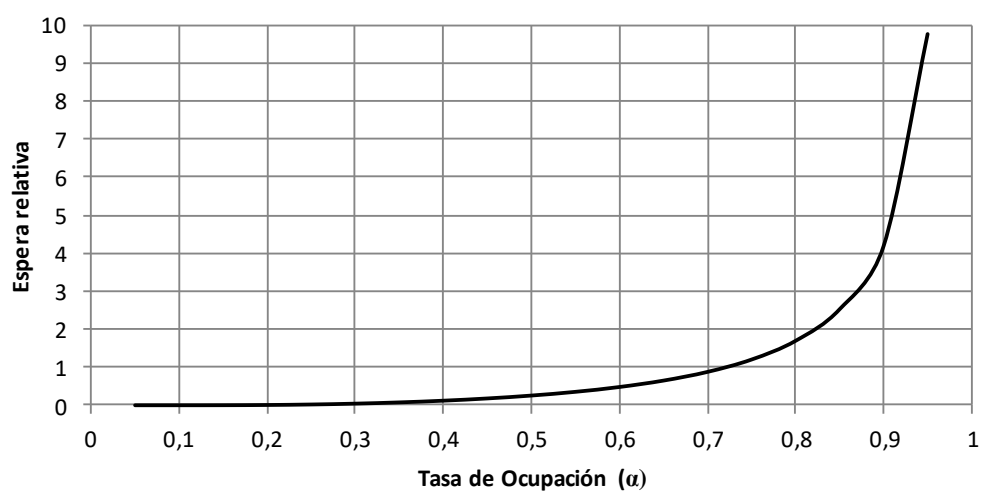
Como ya se comentado, la resolución de la ecuación (84) y con ello la (85) y (86), no resulta inmediata, debiendo procederse a buscar soluciones por tanteos, aspecto que ya se ha presentado en la tabla 49 para sistemas genéricos $E_k/M/1$ y que se vuelve a reproducir en la tabla 50; dando, además, los resultados para el número medio de barcos en cola (L_q), servidos (L_s), o en el sistema (L).

Adicionalmente se presentan también los gráficos representativos de estos sistemas de la ilustración 310 a la ilustración 315.

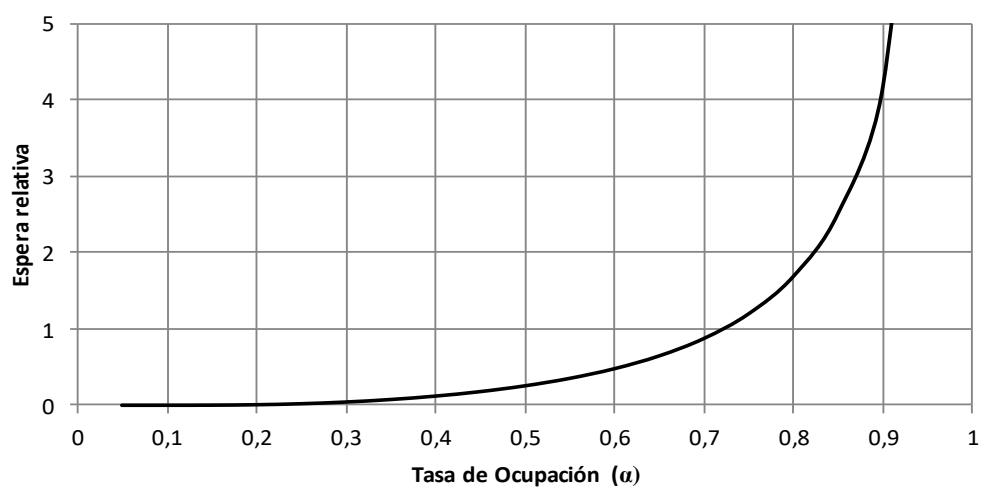
Tabla 50. Variables representativas en un sistema D/M/1 (llegadas constantes, servicio aleatorio y 1 ataque).

	Sistema D/M/1					
	P_0	P_q	η	L_q	L_s	L
0,05	0,999999998	0,000000002	0,000000002	0,0	0,1	0,1
0,10	0,9999546	0,0000454	0,000045402	0,0	0,1	0,1
0,15	0,9987160	0,001284	0,001285651	0,0	0,2	0,2
0,2	0,9930245	0,0069755	0,007024499	0,0	0,2	0,2
0,25	0,98017	0,01983	0,020231184	0,0	0,3	0,3
0,30	0,95911	0,04089	0,042633275	0,0	0,3	0,3
0,35	0,92982	0,07018	0,075476974	0,0	0,4	0,4
0,40	0,89265	0,10735	0,120259900	0,0	0,4	0,4
0,45	0,84815	0,15185	0,179036727	0,1	0,5	0,5
0,50	0,7968	0,2032	0,255020080	0,1	0,5	0,6
0,55	0,7392	0,2608	0,352813853	0,2	0,6	0,7
0,60	0,6758	0,3242	0,479727730	0,3	0,6	0,9
0,65	0,6069	0,3931	0,647717911	0,4	0,7	1,1
0,70	0,5330	0,4670	0,876172608	0,6	0,7	1,3
0,75	0,4545	0,5455	1,200220022	0,9	0,8	1,7
0,80	0,3715	0,6285	1,691790040	1,4	0,8	2,2
0,85	0,2840	0,7160	2,521126761	2,1	0,9	3,0
0,90	0,1930	0,8070	4,181347150	3,8	0,9	4,7
0,95	0,0930	0,9070	9,752688172	9,3	1,0	10,2

Fuente: Elaboración propia.

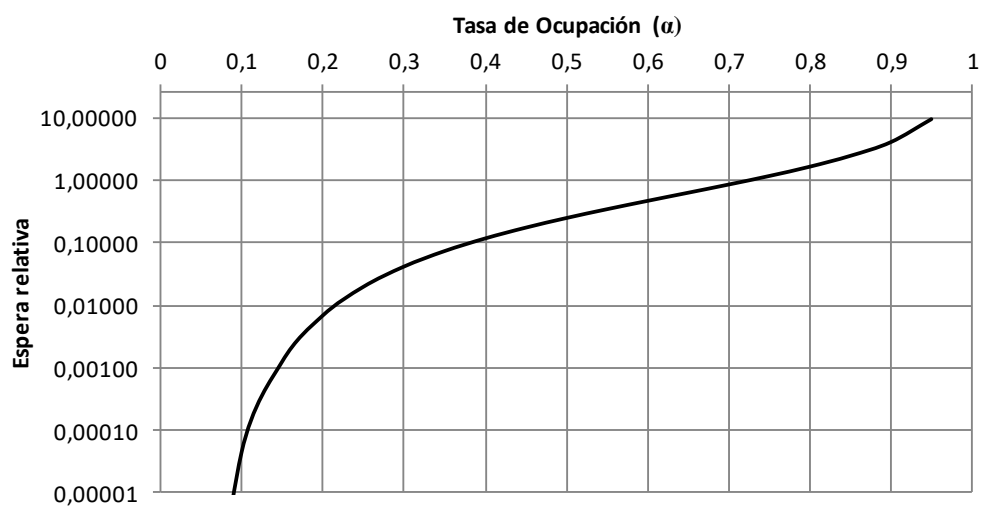
Ilustración 310. Espera relativa en un sistema D/M/1(rango $\eta = 0 - 50$) (escala decimal).

Fuente: Elaboración propia.

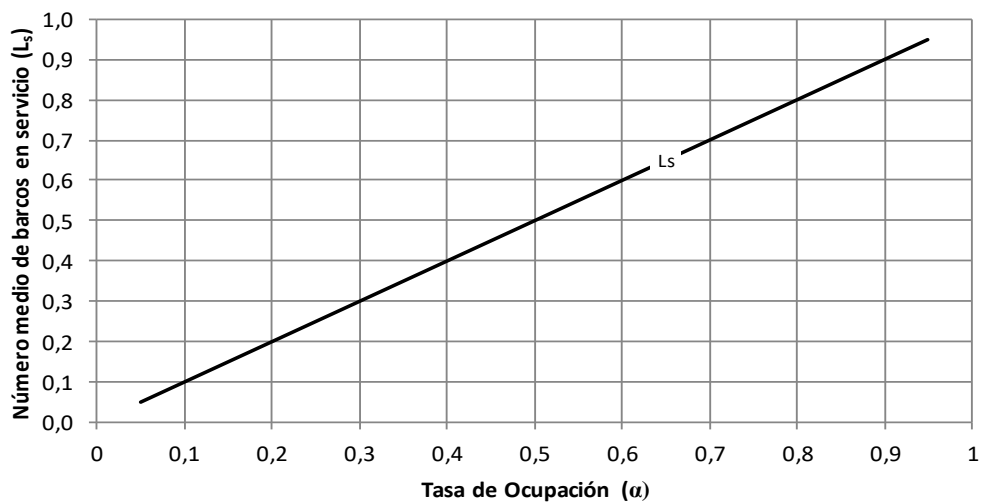
Ilustración 311. Espera relativa en un sistema D/M/1(rango $\eta = 0 - 5$) (escala decimal).

Fuente: Elaboración propia.

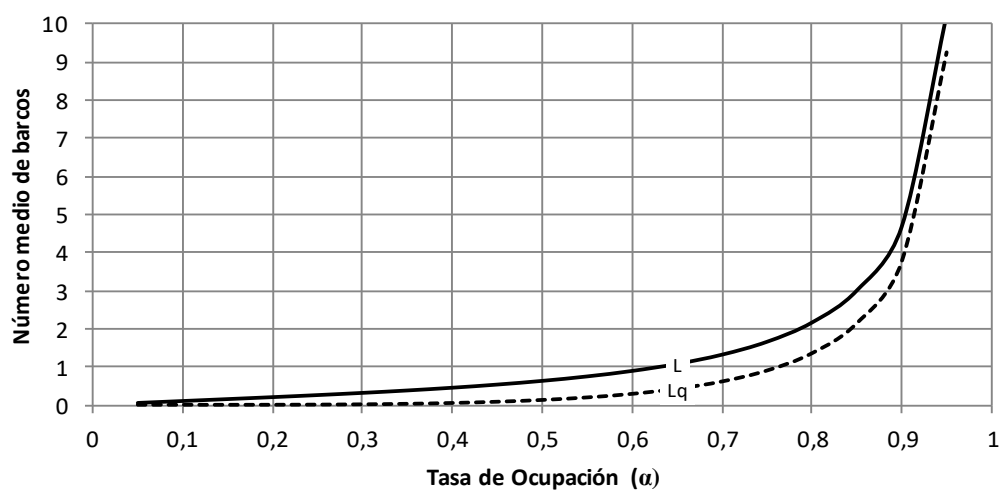
Ilustración 312. Espera relativa en un sistema D/M/1(escala exponencial).



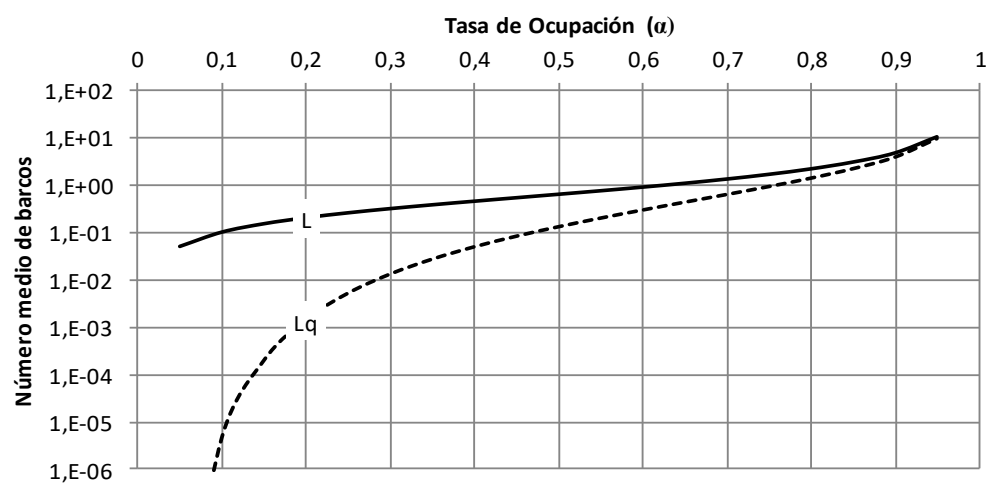
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 313. Número de barcos en servicio (L_s) en un sistema D/M/1.

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 314. Número de barcos en cola (N_q) y en sistema (N_s) en un sistema D/M/1 (escala decimal).

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 315. Número de barcos en cola (N_q) en sistema (N_s) en un sistema D/M/1 (escala exponencial).

Fuente: Elaboración propia.

4.1.7. Comparación sistemas D/M/1, M/D/1 y M/M/1. Efecto de la regularidad en la espera relativa.

Un ejercicio práctico que puede ser de utilidad es comparar los sistemas con ley de llegadas y de servicio constantes y ambas leyes (servicio y llegadas) puramente aleatorias, con el fin de conocer (al menos desde una perspectiva matemática) como afecta la regularidad en la percepción del servicio.

Para ello, se han tomado los resultados obtenidos para los casos con un único atraque de los sistemas anteriores y se han incluido las tablas y gráficas en relación a la espera relativa (η) y longitud media de la cola de espera (L_q) que a continuación se reproducen en la tabla 51.

Como se puede apreciar en la Ilustración 316 y en la ilustración 318 la introducción de regularidad en servicio o llegadas (programación de *slots*) en una terminal mejora sensiblemente los tiempos de espera (y con ello la longitud media de barcos en cola) con respecto a los casos en los que tanto las llegadas de buques como la distribución de tiempos de servicio son puramente aleatorias (curva del sistema M/M/1 por encima de sistemas M/D/1 o D/M/1).

Lo que ya no resulta tan intuitivo, pero si se puede demostrar con este ejemplo concreto es que tiene mayor influencia la regularidad en las llegadas que la regularidad en el servicio, ya que como se observa la curva de esperas relativas (o de longitud de cola) en los sistemas D/M/1 está por debajo de la de los sistemas M/D/1.

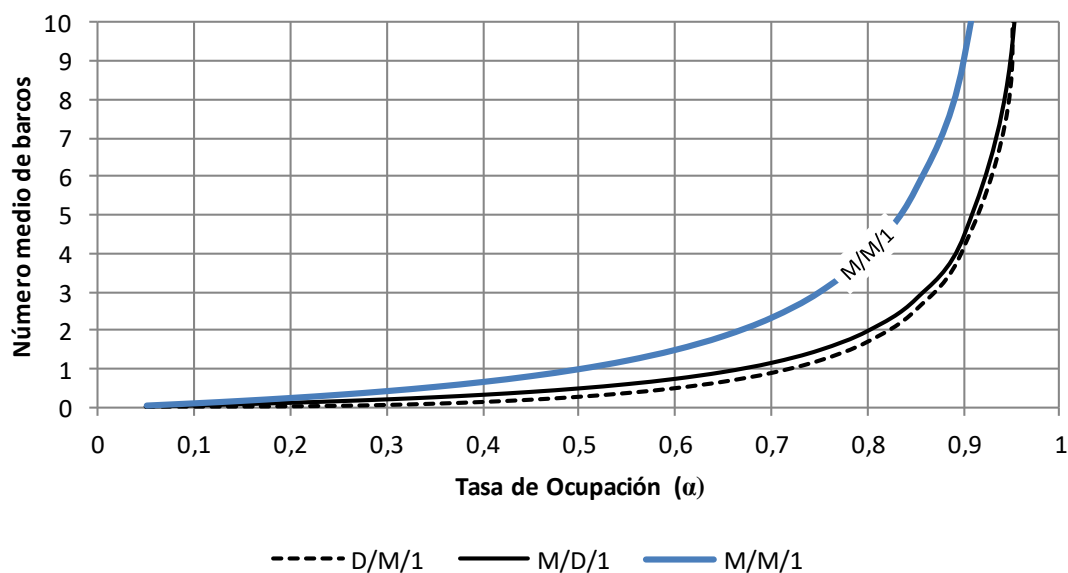
Dicho de otro modo, la probabilidad de espera de buques es menor (y el servicio percibido por los buques mejor) si se actúa con una programación de buques que aumente la regularidad de la llegada antes que si se homogeneiza la ley de servicio (aspecto que se consigue de muchas formas diferentes como regularidad de horarios, condiciones climatológicas, homogeneidad de flota que llega el puerto, ...).

Tabla 51. Comparación de espera relativa (η) y longitud media de la cola (L_q) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1).

α	H			L_q			Comparación de esperas relativas		
	D/M/1	M/D/1	M/M/1	D/M/1	M/D/1	M/M/1	$\frac{\eta(M/D/1)}{\eta(D/M/1)}$	$\frac{\eta(M/D/1)}{\eta(D/M/1)}$	$\frac{\eta(M/M/1)}{\eta(M/D/1)}$
0,05	2,06E-09	0,0263	0,05	1,03E-10	0,0013	0,00	1,28E+07	2,0000	2,555E+07
0,10	4,54E-05	0,0556	0,11	4,54E-06	0,0056	0,01	1,22E+03	2,0000	2,45E+03
0,15	0,0013	0,0882	0,18	0,0002	0,0132	0,03	68,6308	2,0000	137,26
0,20	0,0070	0,1250	0,25	0,0014	0,0250	0,05	17,7949	2,0000	35,59
0,25	0,0202	0,1667	0,33	0,0051	0,0417	0,08	8,2381	2,0000	16,48
0,30	0,0426	0,2143	0,43	0,0128	0,0643	0,13	5,0263	2,0000	10,05
0,35	0,0755	0,2692	0,54	0,0264	0,0942	0,19	3,5671	2,0000	7,13
0,40	0,1203	0,3333	0,67	0,0481	0,1333	0,27	2,7718	2,0000	5,54
0,45	0,1790	0,4091	0,82	0,0806	0,1841	0,37	2,2850	2,0000	4,57
0,50	0,2550	0,5000	1,00	0,1275	0,2500	0,50	1,9606	2,0000	3,92
0,55	0,3528	0,6111	1,22	0,1940	0,3361	0,67	1,7321	2,0000	3,46
0,60	0,4797	0,7500	1,50	0,2878	0,4500	0,90	1,5634	2,0000	3,13
0,65	0,6477	0,9286	1,86	0,4210	0,6036	1,21	1,4336	2,0000	2,87
0,70	0,8762	1,1667	2,33	0,6133	0,8167	1,63	1,3315	2,0000	2,66
0,75	1,2002	1,5000	3,00	0,9002	1,1250	2,25	1,2498	2,0000	2,50
0,80	1,6918	2,0000	4,00	1,3534	1,6000	3,20	1,1822	2,0000	2,36
0,85	2,5211	2,8333	5,67	2,1430	2,4083	4,82	1,1238	2,0000	2,25
0,90	4,1813	4,5000	9,00	3,7632	4,0500	8,10	1,0762	2,0000	2,15
0,95	9,2041	9,5000	19,00	8,7439	9,0250	18,05	1,0322	2,0000	2,06
0,98	999,0000	24,5000	49,00	979,0200	24,0100	48,02	0,0245	2,0000	0,05

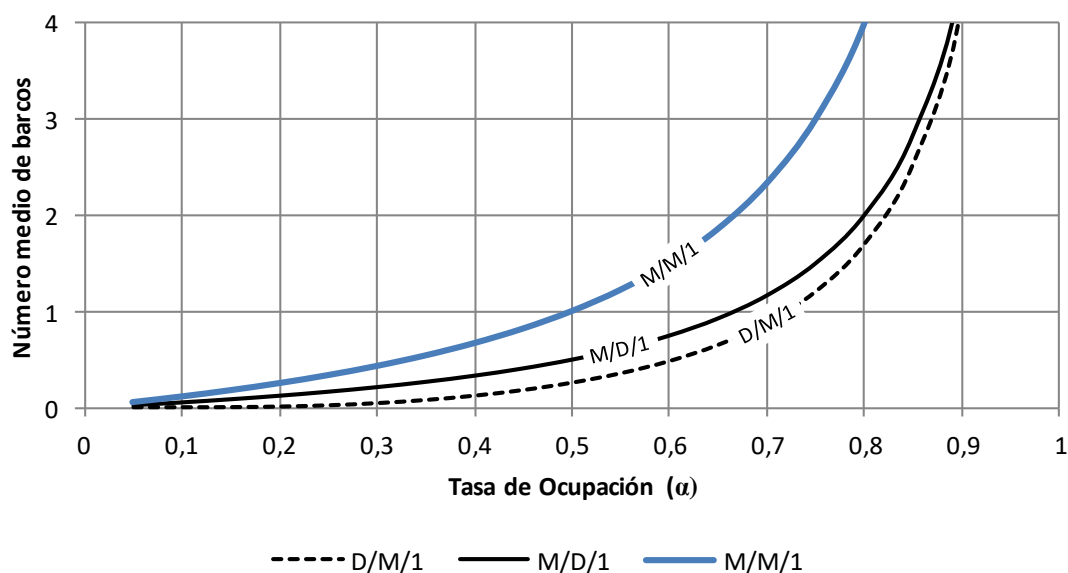
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 316. Comparación de espera relativa (η) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-10 buques).



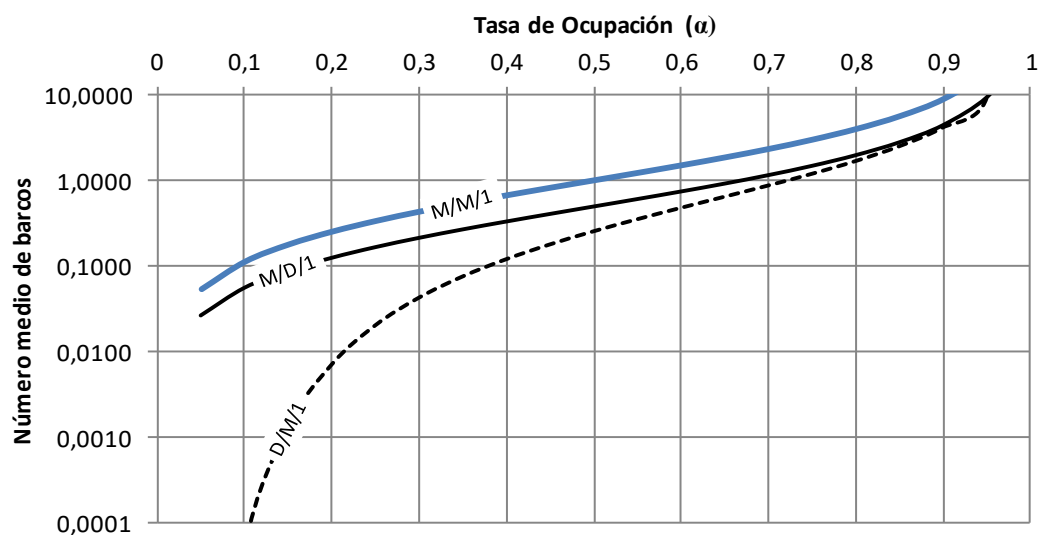
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 317. Comparación de espera relativa (η) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-4 buques).



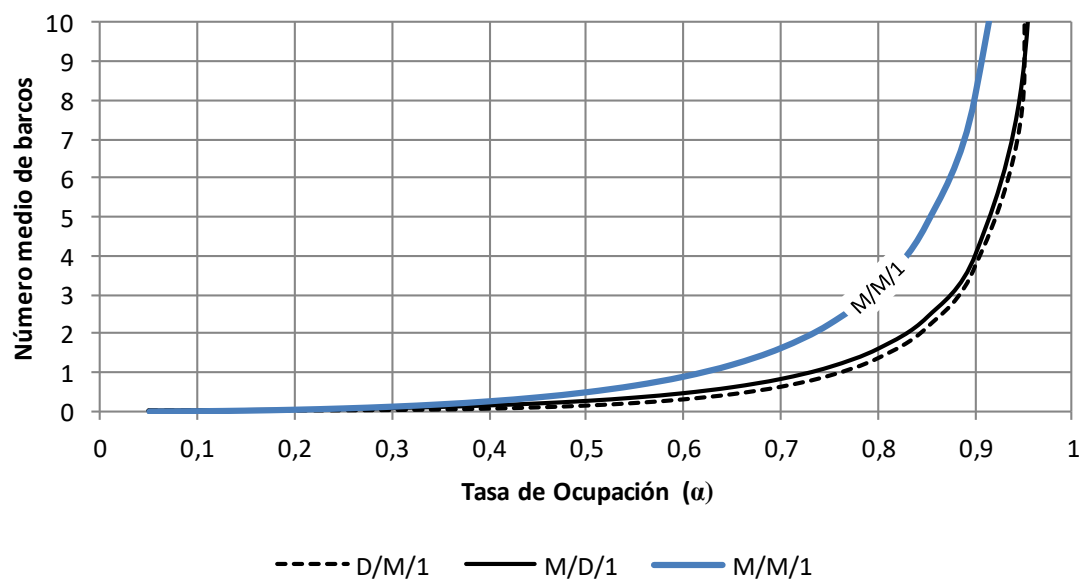
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 318. Comparación de espera relativa (η) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala logarítmica).



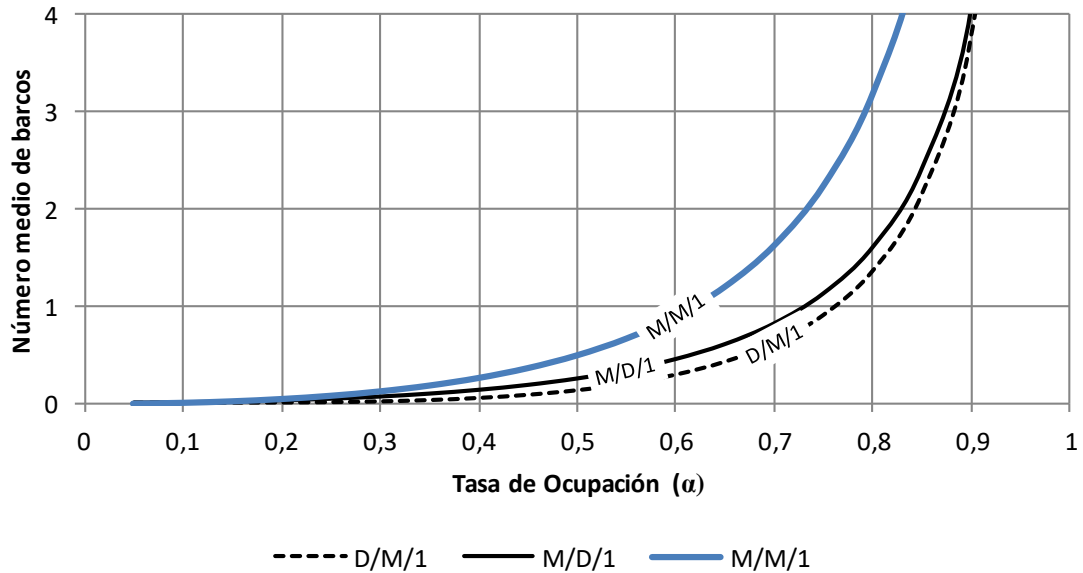
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 319. Comparación entre las longitudes media de cola (L_q) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-10 buques).



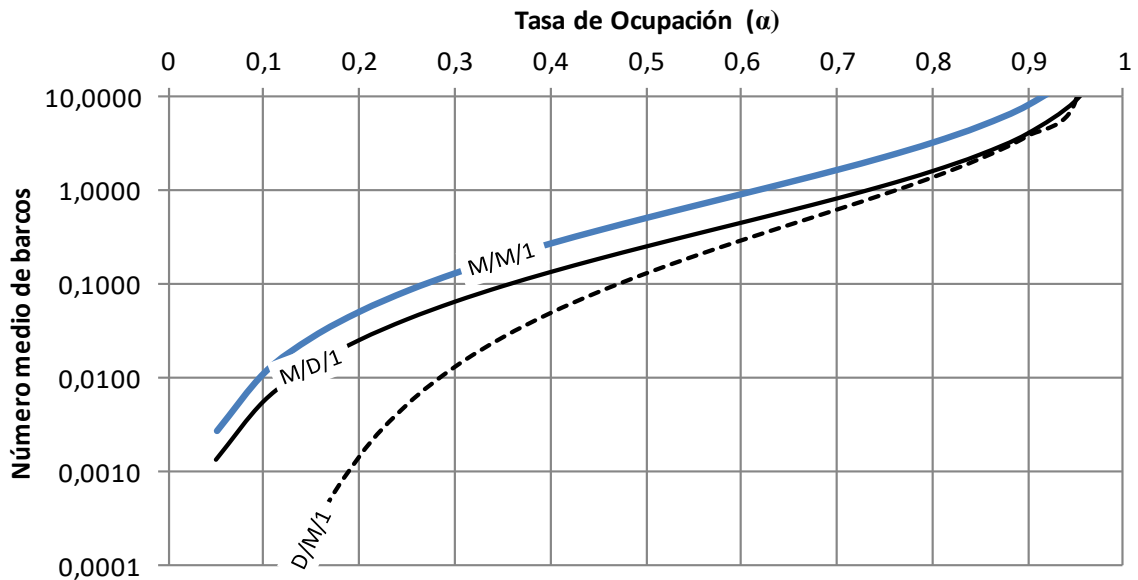
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 320. Comparación entre las longitudes media de cola (L_q) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala decimal. Rango 0-4 buques).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 321. Comparación entre las longitudes media de cola (L_q) en sistemas de un único atraque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1) (Escala logarítmica).



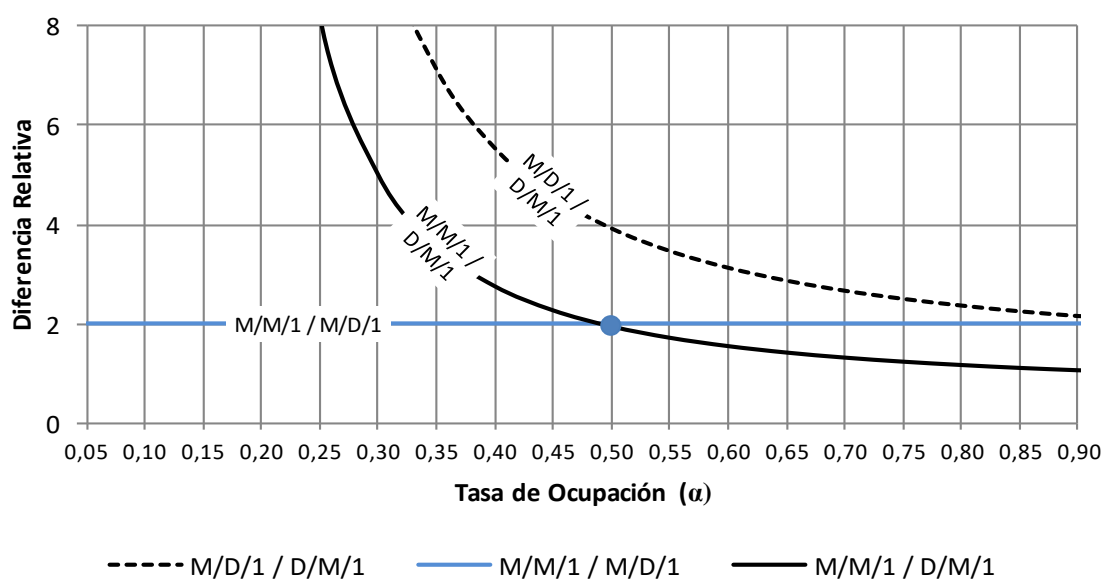
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la ilustración 322 realizada con las tres últimas columnas de la tabla 51, la relación entre los sistemas M/M/1 y M/D/1 es de manera constante 2 (es decir las esperas relativas son la mitad en el caso de tiempos de servicio constantes frente a tiempos de servicio aleatorios).

si en ambos casos la ley de llegadas es aleatoria); mientras que es inferior a 2 a partir de tasas de ocupación del 50% si se comparan sistemas de llegadas aleatorias y constantes (comparaciones M/M/1 entre D/M/1) y mayor de este valor para tasas de ocupación inferiores.

Analizando los sistemas M/D/1 con D/M/1 se observa que la relación es siempre superior a 2 para rangos de tasa de ocupación de hasta el 95%.

Ilustración 322. Diferencias relativas en las tasas relativas en sistemas de un único ataque (D/M/1, M/D/1 y M/M/1).



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Soluciones aproximadas.

4.2.1. Introducción: soluciones exactas versus soluciones aproximadas.

Aunque de interés práctico limitado ya que, como se ha visto, numerosos autores han verificado que aún en el caso de terminales con servicios muy regulares las leyes de llegada de buques sólo en casos muy concretos exceden de orden cinco (E_5), siendo habituales las markovianas (M) o de orden dos (E_2) y los tiempos de servicio no suelen exceder (y de hacerlo lo hacen también en casos muy límites) el orden 8 (E_8) estando usualmente en rangos también inferiores al orden cinco (E_5); encontramos soluciones en la literatura especializada a los casos con leyes de servicio o leyes de llegada constantes (manteniéndose la otra ley como un proceso Poisson) y cualquier número de ataque (en estos casos ya se puso de manifiesto que sólo existe solución exacta si el número de ataques es uno).

Los casos serían por tanto:

- Tiempo de servicio constante ($M/E_{\infty}/n$ o $M/D/n$) con llegadas en un proceso Poisson para cualquier número de atraques.
- Ley de llegadas constante ($E_{\infty}/M/N$ o $D/M/n$) con leyes de servicio exponenciales para cualquier número de atraques.

Estos sistemas fueron investigados por Page (1982) quien ofrecía soluciones aproximadas al tiempo medio de espera para los sistemas $M/D/n$ y $D/M/n$ y los comparaba con las soluciones exactas de los sistemas $M/M/n$.

Este autor tuvo como antecedente las investigaciones anteriores realizadas por Sakasegawa y Yamazaki (1977) quienes también ofrecieron soluciones aproximadas para estos sistemas con 3, 4 y 5 servidores.

4.2.2. Sistemas M/D/N: Tiempos de servicio constante y llegadas markovianas.

El caso de ley de servicio constante y llegadas aleatorias, fue compilado en el caso portuario por Agerschou (2004) quienes ofrecieron la siguiente tabla de esperas relativas (donde nótese que la primera columna, correspondiente a 1 atraque, coincide con los resultados que presentados en el apartado 3.1.4 de este anejo al hablar de sistemas $M/D/1$).

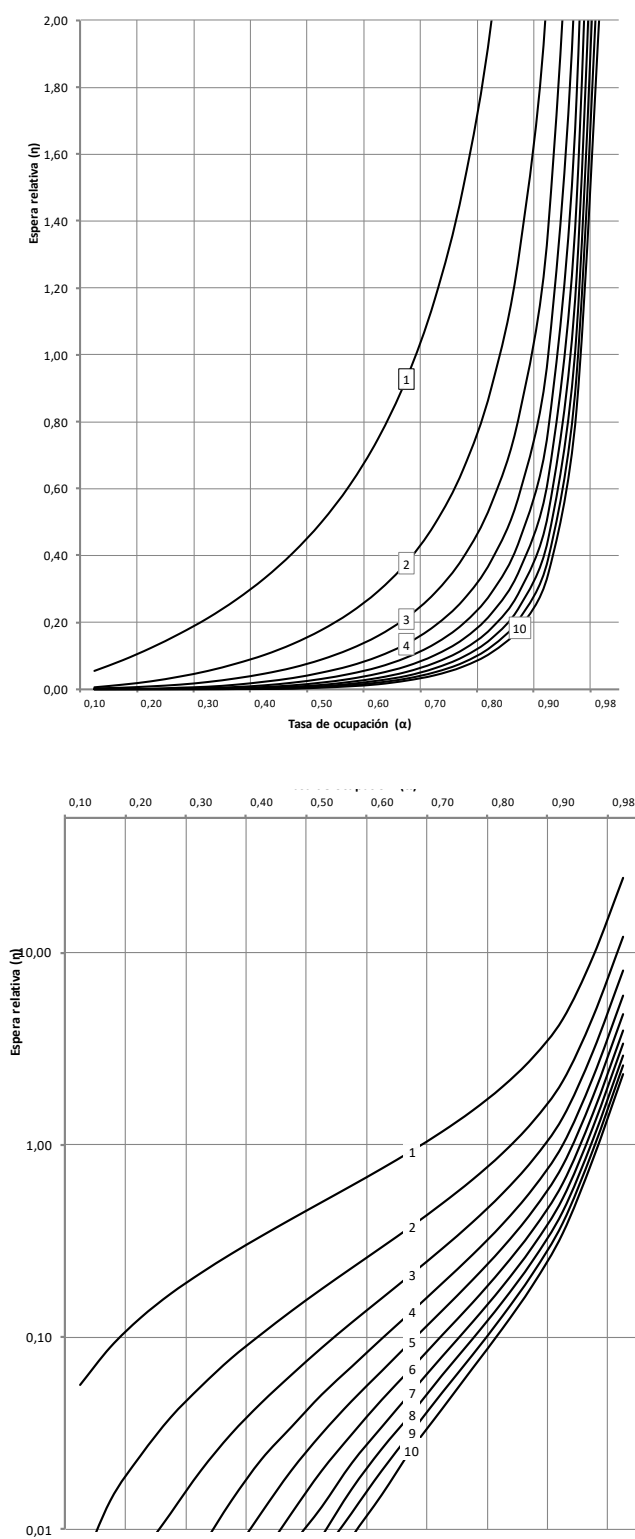
Tabla 52. Esperas relativas en sistemas (M/D/N).

η (sistema M/D/N) (Espera relativa)										
Tasa Ocupación α	Numero de Atraveses									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,10	0,056	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,15	0,088	0,014	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,20	0,125	0,024	0,007	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,25	0,167	0,038	0,012	0,005	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
0,30	0,214	0,055	0,020	0,008	0,004	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
0,35	0,269	0,077	0,031	0,014	0,007	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000
0,40	0,333	0,103	0,045	0,023	0,012	0,007	0,004	0,003	0,002	0,001
0,45	0,409	0,136	0,063	0,034	0,020	0,012	0,008	0,005	0,003	0,002
0,50	0,500	0,177	0,087	0,050	0,031	0,020	0,013	0,009	0,007	0,005
0,55	0,611	0,228	0,118	0,070	0,046	0,031	0,022	0,016	0,012	0,009
0,60	0,750	0,293	0,158	0,098	0,066	0,047	0,034	0,026	0,020	0,015
0,65	0,929	0,378	0,212	0,136	0,095	0,069	0,052	0,040	0,032	0,026
0,70	1,167	0,494	0,286	0,190	0,136	0,102	0,079	0,063	0,051	0,042
0,75	1,500	0,657	0,392	0,267	0,196	0,150	0,119	0,097	0,080	0,068
0,80	2,000	0,903	0,554	0,386	0,289	0,227	0,183	0,152	0,128	0,110
0,85	2,833	1,316	0,827	0,589	0,449	0,359	0,295	0,249	0,213	0,185
0,90	4,500	2,145	1,377	1,000	0,776	0,630	0,526	0,450	0,391	0,345
0,95	9,500	4,631	3,034	2,241	1,769	1,456	1,233	1,067	0,939	0,837
0,98	24,50	12,126	8,020	5,975	4,752	3,938	3,359	2,926	2,592	2,324

Fuente: Agerschou (2004).

La representación gráfica de la espera relativa en estos casos tanto en su escala decimal como logarítmica se incluyen en la ilustración 323, llegándose a mismas conclusiones que se han discutido para sistemas anteriores (fuerte crecimiento de las esperas relativas a partir de tasas de ocupación del 60-70% y mejora sustancial de las esperas relativas para misma tasa de ocupación cuanto mayor es el número de atraques).

Ilustración 323. Espera relativa en sistema M/D/N.



Fuente: Agerschou (2004) y elaboración propia

Como ya se advertía, de la comparación de los sistemas con ley de llegadas y servicio exponenciales (M/M/N) (repasados en el epígrafe 3.1.1 de este anejo) y este caso en el que la ley de servicio se mantiene constante (M/D/N), se obtiene que, para la misma tasa de ocupación (" α ") la espera relativa media (η) es exactamente la mitad en el caso de un único ataque.

Esto es congruente con las formulaciones matemáticas exactas para los sistemas M/M/1 (véase el epígrafe 3.1.1 de este anejo) y M/D/1 (véase el epígrafe 3.1.4) donde se ponía de manifiesto que las esperas relativas eran respectivamente $\alpha/(1-\alpha)$ (caso M/M/1) y $\frac{1}{2} \alpha/(1-\alpha)$ (caso M/D/1).

Para dos o más ataques, a partir de rangos de tasa de ocupación superiores al 50%, los factores oscilan también en rangos similares. Concretamente entre 0'5 y 0'6 pero tendiendo a 0'5 cuanto menor es el número de ataques.

Repitiendo el mismo ejercicio que el incluido en la página 822 (epígrafe 3.1.7) para el caso de un ataque, para un sistema de "N" ataques, se obtienen unas conclusiones parecidas. Es decir, si se comparan los sistemas M/D/N con los D/M/N y los M/M/N, se observa que las esperas relativas mayores se obtienen para el último (tanto leyes de llegada como de servicio aleatorias), consiguiéndose una mayor disminución en las esperas relativas con la regularidad de las llegadas que con la regularidad de los servicios (ilustración 327).

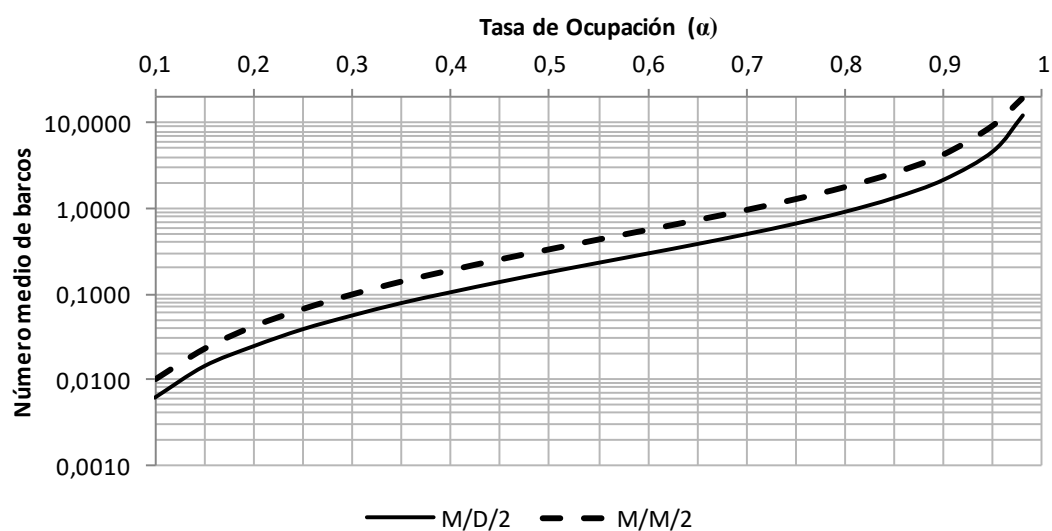
Se presenta como ejemplo la comparación para sistemas de dos (ilustración 324), cinco (ilustración 325) y diez ataques (ilustración 326) con leyes de servicio aleatoria y constante. Los datos numéricos de esperas relativas de estos sistemas se representan en la tabla 53.

Tabla 53. Esperas relativas sistemas M/D/N y M/M/N para N=2, 5 y 10 ataques.

TASA DE OCUPACIÓN α	ESPERAS RELATIVAS (η)					
	Sistemas M/D/N			Sistemas M/M/N		
	N=2	N=5	N=10	N=2	N=5	N=10
0,10	0,006	0,000	0,000	1,01E-02	3,90E-05	1,25E-08
0,15	0,014	0,000	0,000	0,023	2,59E-04	4,91E-07
0,20	0,024	0,001	0,000	0,042	9,58E-04	5,97E-06
0,25	0,038	0,002	0,000	0,067	0,003	3,84E-05
0,30	0,055	0,004	0,000	0,099	0,006	1,65E-04
0,35	0,077	0,007	0,000	0,140	0,011	5,43E-04
0,40	0,103	0,012	0,001	0,190	0,020	1,47E-03
0,45	0,136	0,020	0,002	0,254	0,033	0,003
0,50	0,177	0,031	0,005	0,333	0,052	0,007
0,55	0,228	0,046	0,009	0,434	0,079	0,014
0,60	0,293	0,066	0,015	0,563	0,118	0,025
0,65	0,378	0,095	0,026	0,732	0,173	0,044
0,70	0,494	0,136	0,042	0,961	0,252	0,074
0,75	0,657	0,196	0,068	1,286	0,369	0,123
0,80	0,903	0,289	0,110	1,778	0,554	0,205
0,85	1,316	0,449	0,185	2,604	0,873	0,353
0,90	2,145	0,776	0,345	4,263	1,525	0,669
0,95	4,631	1,769	0,837	9,256	3,511	1,651
0,98	12,126	4,752	2,324	19,253	7,504	3,643

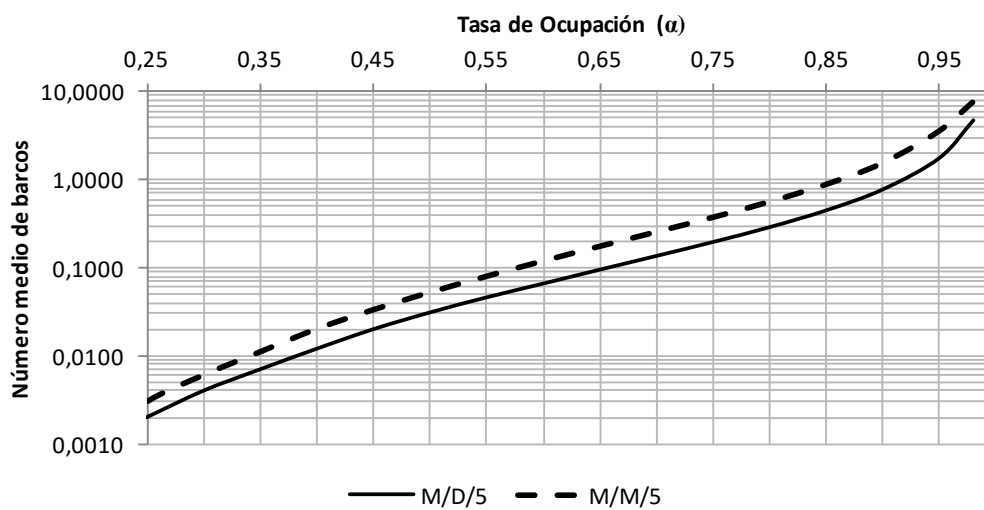
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 324. Comparación relativas sistemas M/D/2 y M/M/2.



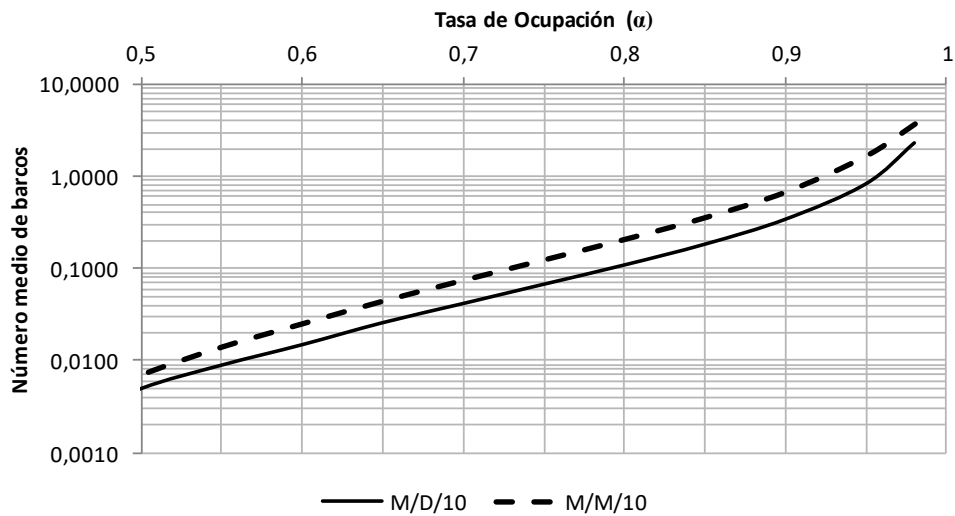
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 325. Comparación relativas sistemas M/D/5 y M/M/5.



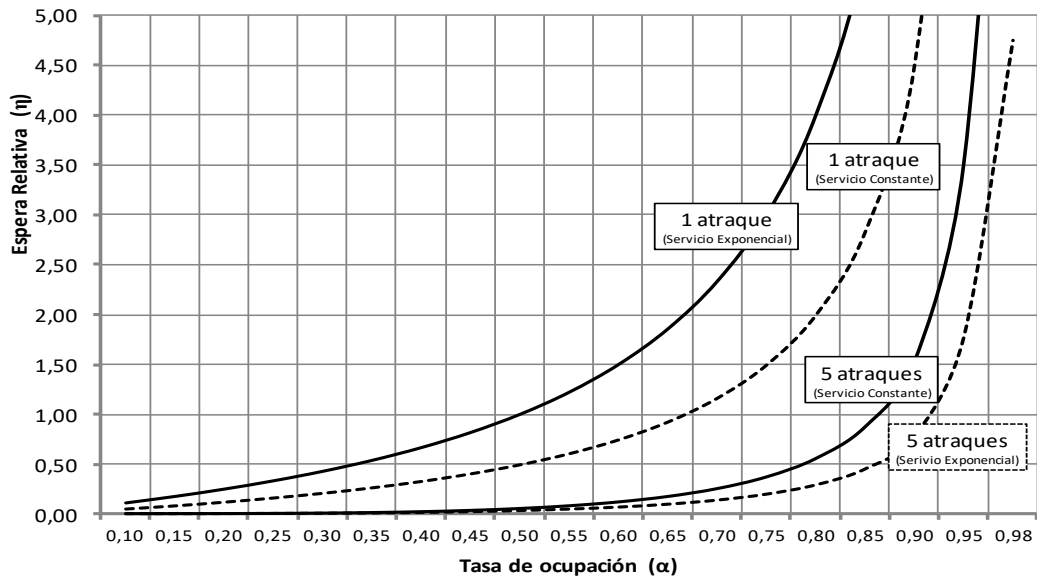
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 326. Comparación relativas sistemas M/D/10 y M/M/10.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 327. Comparación de las esperas relativas con tiempos de servicio exponenciales y constantes (M/M/N versus M/D/N) para el caso de un sistema con uno (1) y cinco (5) atraques.



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 54 y en la Ilustración 328 se han representado los valores que resultan de dividir la espera relativa del sistema con servicio constante ($\eta(M/D/N)$) entre la espera relativa de los sistemas con servicios aleatorios ($\eta(M/M/N)$) dentro de un rango estable de tasas de ocupación de entre el 45% y el 90%, y se obtiene que para un número de atraques de entre 1 y 10 este

cociente tiene una tendencia creciente con el número de ataques (a mayor número de ataques ambas curvas de espera relativa están más cerca y por tanto el cociente es mayor); creciendo desde el 50% en el caso exacto de un ataque, hasta el 57% en el caso de 10 ataques.

Dicha progresión se puede ajustar además a un función exponencial con un coeficiente de correlación muy alto (0,986) tal y como se representa en la ilustración 328.

La ecuación resultante de este ajuste es:

$$\eta_{(M/D/N)}/\eta_{(M/D/N)} = 0,4955 \cdot N^{0,0613} \quad (93)$$

donde N es el número de ataques.

Dando como suficientemente buena esta ecuación dentro del campo de ampliación de planificación portuaria y operando con diferentes valores de N, se pueden obtener soluciones aproximadas para los sistemas M/D/N mucho más allá de las tabuladas por diferentes autores y recopiladas como se vía por Agerschou (2004) y aquí presentadas en la tabla 54.

Para ello bastaría con calcular dicha relación a través de la ecuación³⁶⁷:

$$\eta_{(M/D/N)}/\eta_{(M/D/N)} = 0,4955 \cdot N^{0,0613} \quad (94)$$

y multiplicar los valores que resultan de la formulación exacta para los sistemas M/M/N que se obtienen en las ecuaciones (24) y (26).

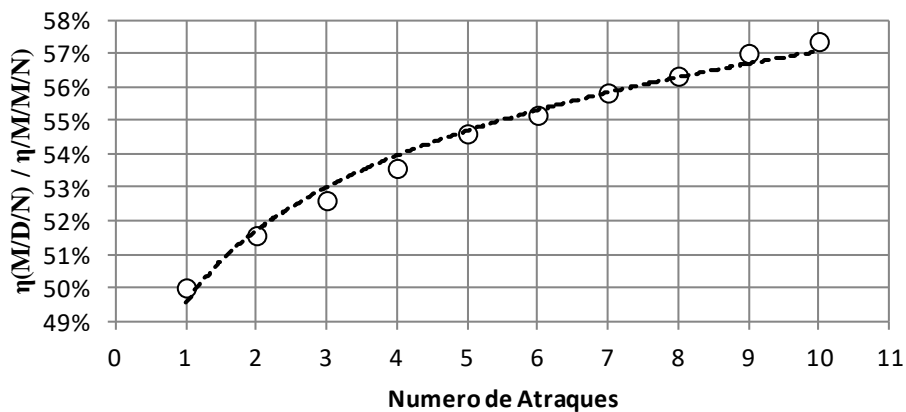
Haciendo este ejercicio práctico se puede inferir además que, hasta un número de 20 ataques, la relación no supera el 60% y que no es hasta el número de 100 ataques cuando la expresión toma un valor en el entorno del 65%.

³⁶⁷ El coeficiente de regresión para este ajusta resulta $R^2=0.9859$, estableciéndose por tanto un alto grado de correlación.

Tabla 54. Relación entre esperas relativas sistemas M/D/N y M/M/N ($\eta(M/D/N)/\eta(M/M/N)$).

Tasa Ocupación α	$\eta(M/D/N)/\eta(M/M/N)$									
	Numero de Atraveses									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,45	50%	54%	56%	58%	61%	61%	65%	64%	58%	58%
0,50	50%	53%	55%	58%	59%	61%	60%	61%	68%	69%
0,55	50%	53%	54%	56%	58%	59%	60%	62%	64%	65%
0,60	50%	52%	53%	55%	56%	57%	58%	60%	61%	59%
0,65	50%	52%	53%	54%	55%	56%	56%	56%	58%	59%
0,70	50%	51%	52%	53%	54%	55%	55%	56%	56%	57%
0,75	50%	51%	52%	52%	53%	53%	54%	54%	54%	55%
0,80	50%	51%	51%	52%	52%	53%	53%	53%	53%	54%
0,85	50%	51%	51%	51%	51%	52%	52%	52%	52%	52%
0,90	50%	50%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	52%
0,95	50%	50%	50%	50%	50%	50%	51%	51%	51%	51%
PROMEDIO	50%	52%	53%	54%	55%	55%	56%	56%	57%	57%

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 328. Relación entre esperas relativas sistemas M/D/N y M/M/N ($\eta(M/D/N)/\eta(M/M/N)$).

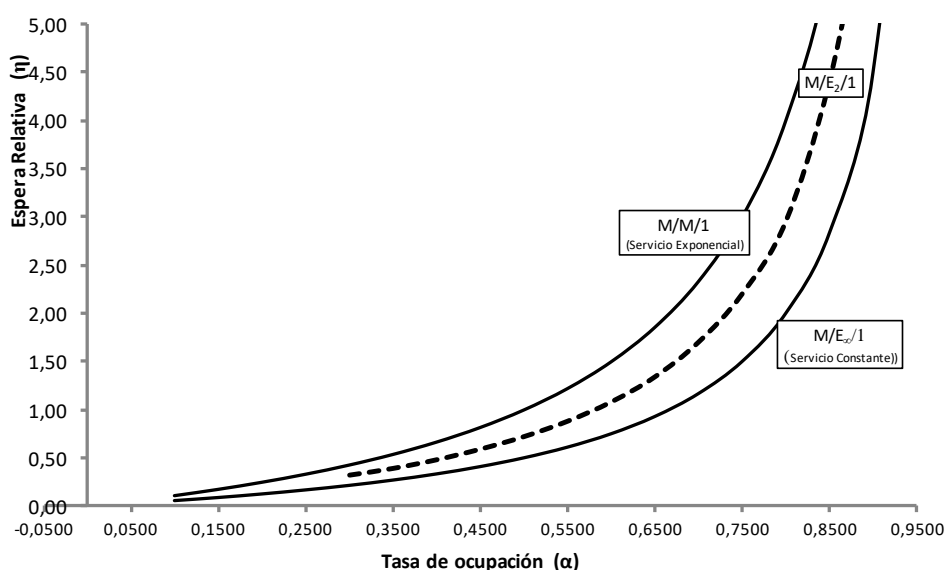
Fuente: Elaboración propia.

Como resumen se puede concluir que, efectivamente, existe una relación entre la mejora del servicio (expresada mediante una reducción de la espera relativa) y la regularidad de dicho servicio, de tal modo que para servicios constantes se obtienen menores esperas que para un sistema que siga una distribución Erlang de orden k y en el extremo mejores que cuando la fase es la unidad ($k=1$) correspondiente a servicios aleatorios.

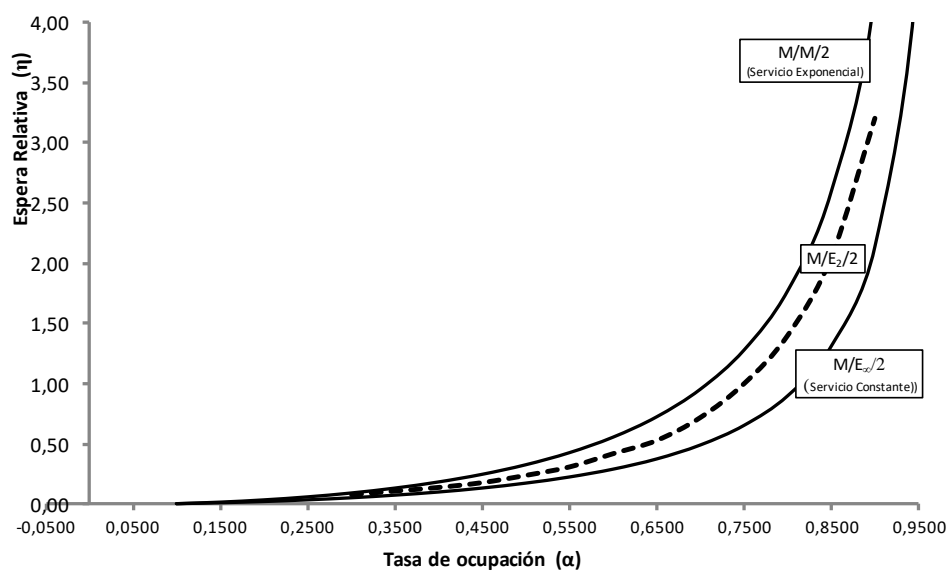
Esta mejora es tanto mayor cuanto menor es el número de ataques, siendo máxima con un único ataque. Si se aborda la comparación entre sistemas con servicios aleatorios y constantes (a llegadas constantes) el factor de mejora es del 50% y éste va decreciendo con el número de ataques hasta hacerse del orden del 60% con 20 ataques o del 65% con 100 ataques.

De igual modo, toda vez que una ley de distribución constante equivale a una distribución Erlang de orden $k=\infty$ y una exponencial de orden $k=1$, cualquier ley de servicio que siga una distribución Erlang de orden k (E_k) encuentra los límites superiores e inferiores entre ambos valores, estando tanto más próximas y en relación 0.5 cuanto mayor sea el orden k de dicha distribución E_k , algo que se representa de manera gráfica en las siguientes aplicaciones prácticas (Ilustración 329 a 332) para el caso de uno, dos, cinco y diez ataques y donde se observa como el sistema $M/E_2/N$ se sitúa entre los sistemas $M/M/N$ y $M/E_\infty/N$.

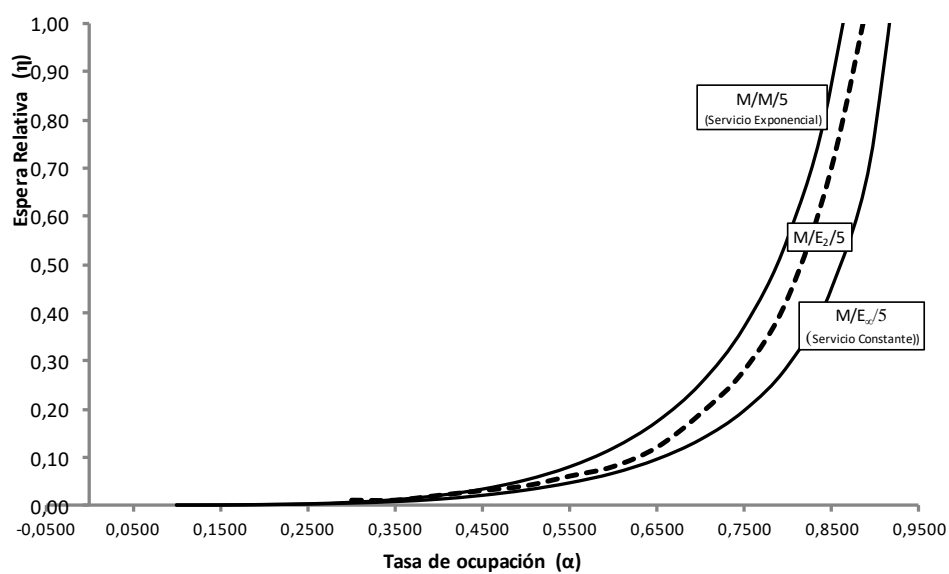
Ilustración 329. Comparación relativa de sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y $M/D/N$. Caso de 1 ataque.



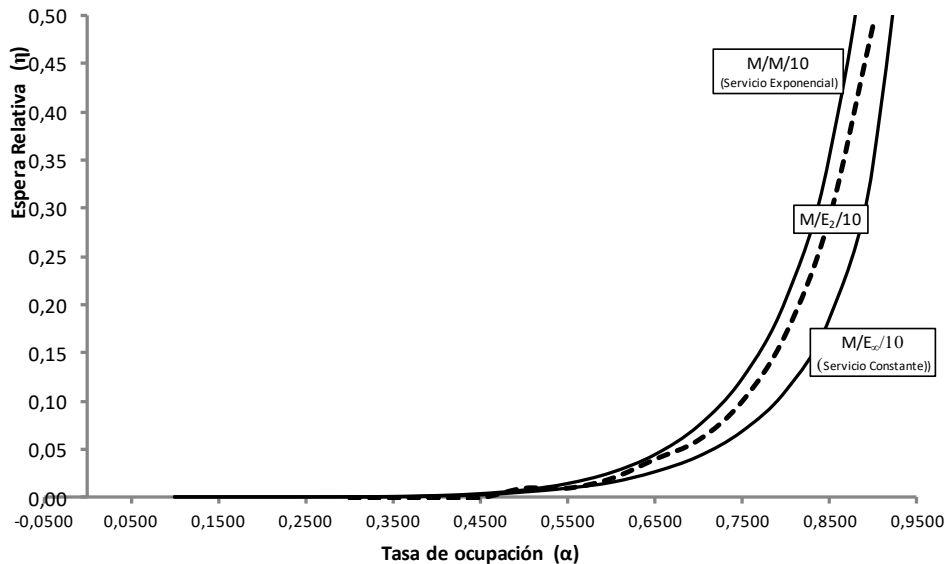
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 330. Comparación relativa de sistemas M/M/N, M/E₂/N y M/D/N. Caso de 2 atraques.

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 331. Comparación relativa de sistemas M/M/N, M/E₂/N y M/D/N. Caso de 5 atraques.

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 332. Comparación relativa de sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y $M/D/N$. Caso de 10 ataques.

Fuente: Elaboración propia.

De la observación de las gráficas se aprende que, para igual tasa de ocupación, las diferencias en cuanto a la espera relativa son tanto mayores (entre una ley Markoviana y otra de orden “ k ”) cuanto menor es el número de ataques; lo que permite resolver problemas del tipo $M/E_k/N$ si el número de ataques es elevado con suficiente aproximación si se dan valores intermedios entre los casos $M/M/N$ y $M/D/N$.

Es decir, la espera relativa en términos absolutos es relativamente poco sensible al orden k si el número de ataques es muy elevado y tanto menos sensible (también en términos absolutos) cuanto más bajas sean las tasas de ocupación.

4.2.3. Sistemas $D/E_k/N$ y $D/M/N$: Tiempos de llegada constante y leyes de servicio E_k o Determinista (constante).

Sakasegawa y Yamazaki (1977) realizan, entre otras, simulaciones para los sistemas $D/M/N$ y $D/E_3/N$ para los casos de 3 a 5 servidores (los estudios de estos autores se centraban en sistemas de telecomunicación) y proponen unas fórmulas de aproximación que ofrecen suficiente grado de exactitud.

Continuando con estos estudios Page (1982), ofrecía soluciones aproximadas al tiempo medio de espera $D/M/N$ y los comparaba con las soluciones exactas de los sistemas $M/M/n$ y a las aproximadas $M/D/n$ en su publicación “*Tables of waiting times for $M/M/n$, $M/D/n$ and $D/M/n$ and their use to give approximate waiting times in more general queues*”.

El propio Page (1982) concluye que tanto sus soluciones como las de Sakasegawa y Yamazaki (1977) sobreestimaban los datos de tiempo de espera, pero siendo la formulación de Page más exacta que la de Sakasegawa y Yamazaki (1977) en función de la simulaciones realizadas.

A su vez, dentro de los estudios con leyes de llegadas constantes, destacan los estudios realizados por Edmon (1975) en el marco de estudio de atraques de terminales de contenedores. Este autor introducía en sus estudios la premisa de que los barcos llegaban en intervalos iguales de tiempo y, de no hacerlo, infería que dicha llegada no se producía (pérdida del *slot*); algo que puede ser consistente desde el punto de visto teórico (pero que como se ha puesto de manifiesto otros autores desmienten en base a la observación de datos reales) en casos como los ya mencionados de terminales dedicadas sometidas a programación con asignación previa de *slots* y no con criterios de asignación de atraque a la llegada del buque.

Para resolver este caso, Edmon utilizaba leyes de servicio E_2 (distribución Erlang con $k=2$) y presentaba resultados analíticos para rangos usuales de tasa de ocupación (" α ") entre 0,3 y 0,6 para el caso de un único atraque (sistema $D/E_2/1$) y limitados a probabilidades de llegada dentro de *slot* entre 0,90 y 0,75 respectivamente.

Estos sistemas también fueron investigados por Sabria y Daganzo (1989) quienes ofrecían soluciones aproximadas a la QT en el caso de sistemas con unas llegadas sometidas a programación pero en las que en realidad se presenta cierta desviación entre las llegadas reales y las programadas.

Bajo el modelo de estos autores la secuencia de salida de barcos del sistema puede variar de la secuencia de entrada, es decir no se sigue estrictamente la disciplina FIFO en el servicio.

Estos autores proporcionaban diferentes fórmulas aproximadas que pueden ser utilizadas para diferentes distribuciones de tiempos de servicio (a distribuciones inter-llegadas constantes) y diferentes distribuciones en cuanto a la desviación entre las llegadas reales y las programadas.

Como curiosidad, sus investigaciones también aportaban una solución analítica exacta para el caso concreto en el que el tiempo de servicio es constante y las desviaciones entre las llegadas reales y las programadas eran variables independientes Gumbel.

4.2.4. Sistemas M/E_k/N: Distribución tiempos de servicio Erlang (E_k) y llegadas markovianas.

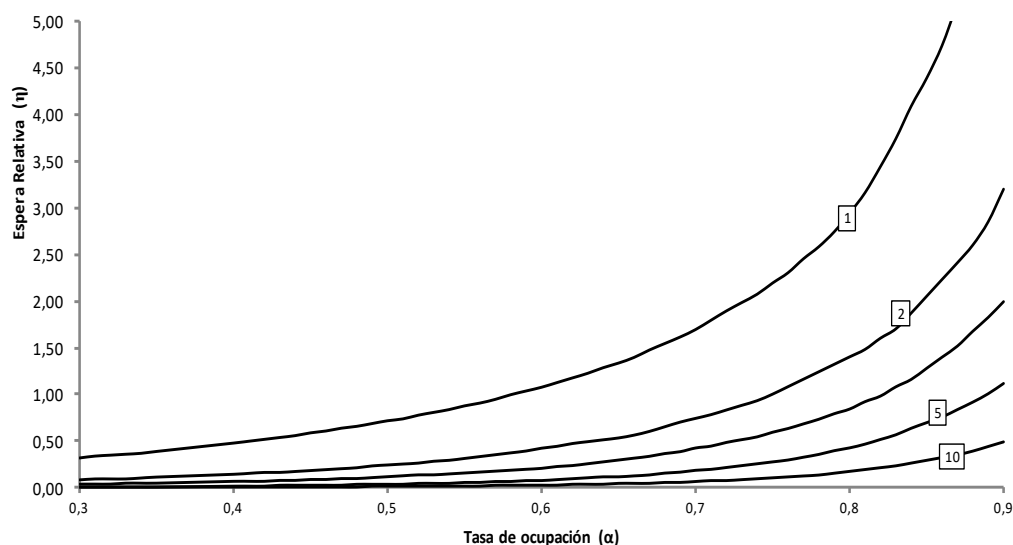
En algunos casos, las leyes de servicio no se ajustan a leyes exponenciales o constantes si no a una función genérica Erlang de orden " k " (E_k). Por ello es siempre conveniente realizar previamente y si se dispone de datos reales de servicio test como los ya definidos (χ^2) con el objetivo de encontrar la distribución de Erlang que más se asemejan mediante variación del parámetro de forma k ($k=2,3,4,\dots$).

Una vez resuelta de manera práctica cual es el parámetro de forma k que mejor ajusta a nuestro caso se debe abordar su resolución numérica aproximada. Para ello sirven de referencia los estudios realizados por Page (1972) en los que el autor presentaba unas aproximaciones de las esperas relativas para valores amplios de K entre 1 e ∞ para sistemas $M/E_k/N$.

De los estudios y los resultados obtenidos por Edmon (1975) se desprendía que las aproximaciones de Page (1972) eran suficientemente válidas para tasas de ocupación relativamente altas pero no para tasas de utilización bajas. Por lo tanto, debe considerarse este aspecto en el caso de su utilización práctica (aunque conviene recordar que cuanto más baja es la tasa de ocupación menos diferencia absoluta hay en los resultados de espera relativa que se obtiene variando el parámetro “ k ”).

Las aproximaciones propuestas por Page (1972), para el caso $k=2$ fueron recogidos en la publicación “*Port Development: a Handbook for Planners in Developing Countries*” (UNCTAD, 1979 y 1985) y que se transcriben en la tabla 55 y se representan gráficamente en la ilustración 333.

Ilustración 333. Esperas relativas en función del número de ataque para un sistema $M/E_2/N$.



Fuente: Elaboración propia.

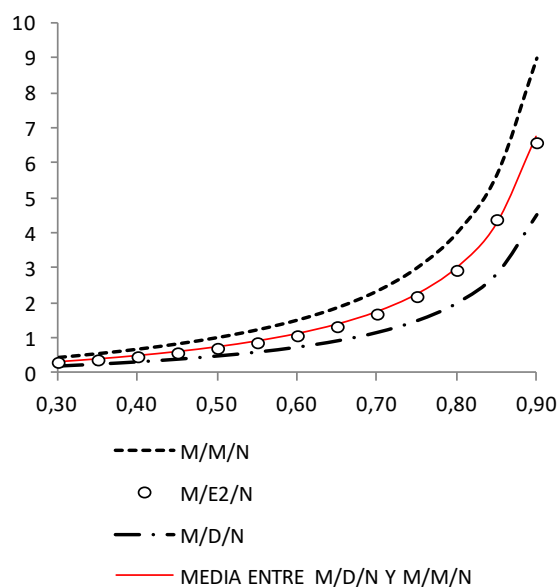
Tabla 55. Espera Relativa Sistema M/E₂/N.

Tasa de Ocupación (α)	Espera Relativa Sistema M/E ₂ /N														
	Numero de Atraveses														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,30	0,32	0,08	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,31	0,34	0,09	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	0,35	0,09	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,33	0,36	0,09	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,34	0,37	0,10	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,35	0,39	0,11	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,40	0,48	0,14	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,41	0,50	0,15	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,42	0,52	0,16	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,43	0,54	0,16	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,44	0,56	0,17	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,45	0,59	0,18	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,46	0,61	0,19	0,08	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,47	0,64	0,20	0,09	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,48	0,66	0,21	0,09	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,49	0,69	0,23	0,10	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,72	0,24	0,11	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,51	0,74	0,25	0,12	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
0,52	0,78	0,26	0,13	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
0,53	0,81	0,28	0,13	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
0,54	0,84	0,29	0,14	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
0,55	0,88	0,31	0,15	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
0,56	0,91	0,33	0,16	0,10	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
0,57	0,95	0,35	0,17	0,11	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
0,58	1,00	0,37	0,18	0,11	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
0,59	1,04	0,39	0,19	0,12	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
0,60	1,08	0,42	0,20	0,13	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
0,61	1,13	0,44	0,22	0,14	0,09	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
0,62	1,18	0,47	0,23	0,15	0,10	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
0,63	1,23	0,49	0,25	0,16	0,11	0,08	0,07	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
0,64	1,29	0,51	0,27	0,17	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
0,65	1,34	0,53	0,29	0,19	0,12	0,10	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
0,66	1,40	0,60	0,31	0,20	0,13	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
0,67	1,48	0,63	0,33	0,22	0,14	0,12	0,09	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
0,68	1,55	0,66	0,36	0,23	0,16	0,13	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
0,69	1,62	0,70	0,38	0,25	0,17	0,14	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
0,70	1,70	0,72	0,42	0,27	0,19	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
0,71	1,80	0,78	0,44	0,29	0,20	0,17	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03
0,72	1,90	0,83	0,48	0,31	0,22	0,17	0,13	0,11	0,08	0,07	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03
0,73	1,99	0,87	0,51	0,34	0,24	0,18	0,14	0,12	0,09	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04
0,74	2,08	0,93	0,54	0,36	0,26	0,20	0,16	0,13	0,10	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05	0,04
0,75	2,20	1,00	0,59	0,39	0,28	0,22	0,17	0,14	0,11	0,10	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05
0,76	2,31	1,08	0,63	0,42	0,30	0,24	0,19	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,07	0,06	0,06
0,77	2,46	1,16	0,68	0,45	0,33	0,26	0,21	0,17	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07
0,78	2,59	1,23	0,73	0,49	0,36	0,28	0,23	0,19	0,16	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
0,79	2,75	1,30	0,79	0,53	0,40	0,31	0,25	0,21	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
0,80	2,95	1,40	0,84	0,57	0,43	0,34	0,27	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09
0,81	3,17	1,50	0,92	0,63	0,47	0,38	0,30	0,24	0,21	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10
0,82	3,45	1,70	0,98	0,68	0,52	0,42	0,34	0,27	0,23	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11
0,83	3,75	1,85	1,08	0,74	0,57	0,47	0,38	0,31	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	0,14	0,13
0,84	4,10	1,90	1,16	0,81	0,64	0,50	0,42	0,34	0,29	0,26	0,22	0,20	0,17	0,16	0,15
0,85	4,40	2,05	1,28	0,90	0,70	0,56	0,46	0,38	0,32	0,29	0,25	0,22	0,19	0,18	0,16
0,86	4,75	2,20	1,40	0,98	0,76	0,61	0,51	0,42	0,36	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20	0,18
0,87	5,20	2,40	1,52	1,07	0,84	0,67	0,56	0,47	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23	0,20
0,88	5,60	2,60	1,68	1,16	0,92	0,75	0,63	0,52	0,45	0,39	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24
0,89	6,10	2,85	1,83	1,29	1,01	0,83	0,70	0,58	0,50	0,44	0,40	0,36	0,32	0,29	0,27
0,90	6,60	3,20	2,00	1,43	1,12	0,92	0,76	0,64	0,56	0,49	0,44	0,40	0,36	0,33	0,30

Fuente: UNCTAD (1979 y 1985).

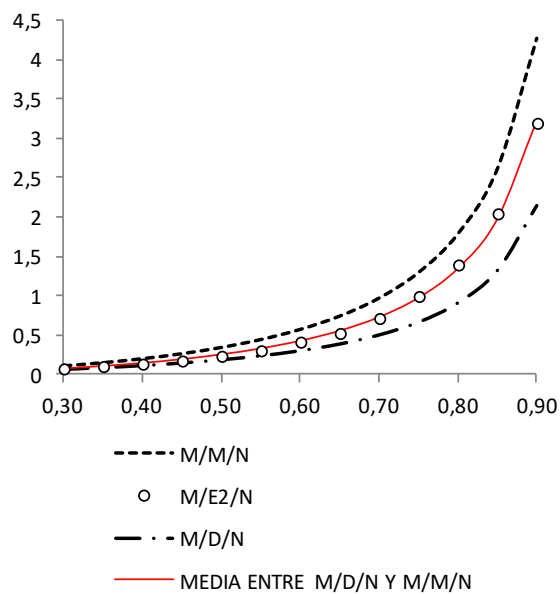
Resulta además que las aproximaciones propuestas por Page (1972) y recopiladas por la UNCTAD (1979 y 1985), para el caso $k=2$ (M/E₂/N), son la media entre los casos extremos ($k=1$ o exponencial que se han incluido en el apartado 3.1.3) y $k=\infty$ o constante que se recogen en el apartado 3.1.4), tal y como se muestra en la ilustración 334 a 337 para los casos de 1, 2, 5 y 10 atraques.

Ilustración 334. Tasa de ocupación (abcisas) *versus* esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 1 atraque.



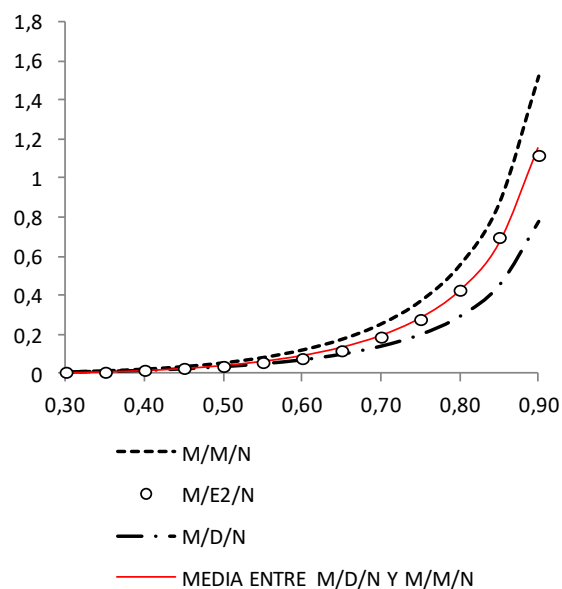
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 335. Tasa de ocupación (abcisas) *versus* esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 2 atraques.



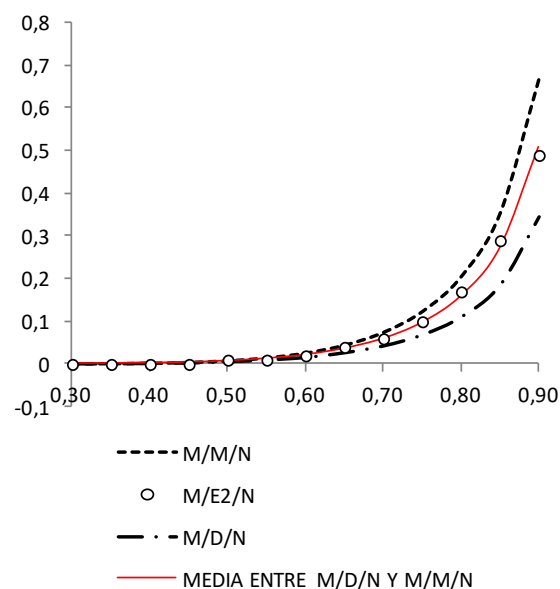
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 336. Tasa de ocupación (abcisas) *versus* esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 5 ataques.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 337. Tasa de ocupación (abcisas) *versus* esperas relativas (ordendas). Comparación en sistemas M/M/N, M/E2/N y M/D/N. Caso 10 ataques.



Fuente: Elaboración propia.

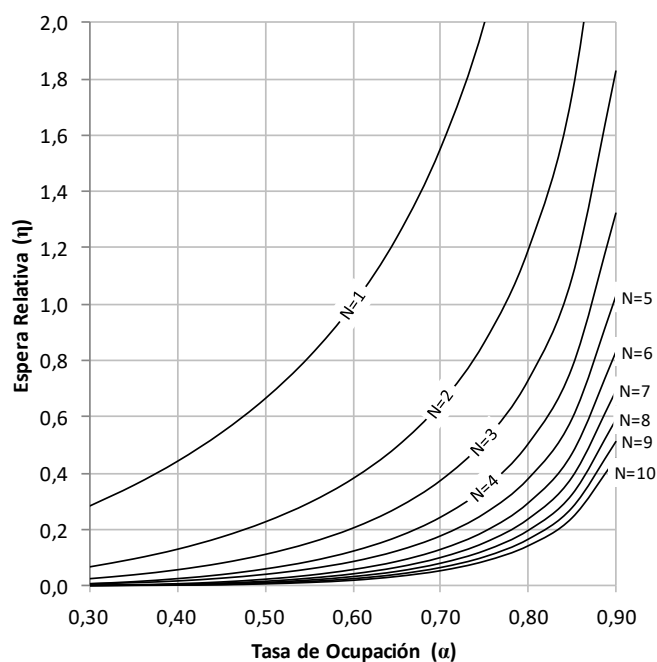
Adicionalmente según Agerschou (2004), los datos proporcionados en los estudios de Edmon (1975) para distribución Erlang de orden 3 (M/E₃/N) y Sakasegawa y Yamazaki (1977) quienes

ofrecen gráficas para sistemas concretos como los $M/E_3/3$, $M/E_3/4$, $M/E_3/5$ coinciden aproximadamente (para factores de utilización o tasas de ocupación altas) con la media ponderada de los valores con $K=1$ ($M/D/N$) y dos veces los valores para el sistema $K=\infty$ ($M/D/N$). Esta relación enunciada por Agerschou (2004) se muestra en tabla 56 y en sendas gráficas (ilustración 338 y ilustración 339).

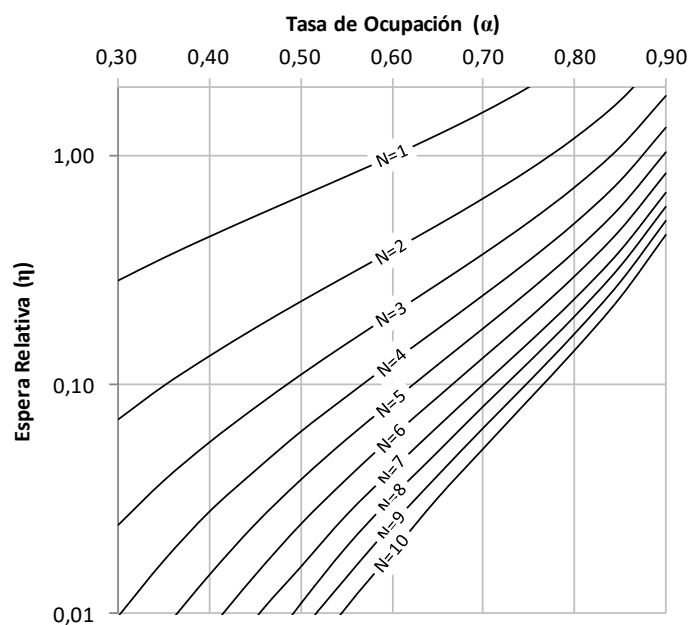
Tabla 56. Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E_3/N$.

Espera Relativa										
Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E_3/N$										
Tasa Ocupación α	Numero de Atravesamientos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,30	0,285524	0,069634	0,024449	0,009744	0,004585	0,002218	0,001092	0,000211	0,000107	0,000055
0,35	0,358821	0,097867	0,038175	0,017065	0,008403	0,004581	0,002355	0,001228	0,000983	0,000181
0,40	0,444222	0,132159	0,056144	0,027931	0,014633	0,008366	0,004814	0,003284	0,002119	0,001156
0,45	0,545394	0,175306	0,079591	0,042141	0,024341	0,014582	0,009428	0,005956	0,003719	0,002480
0,50	0,666667	0,229111	0,110632	0,062319	0,038050	0,024349	0,015924	0,010920	0,008078	0,005740
0,55	0,814741	0,296564	0,151055	0,088666	0,057150	0,038290	0,026847	0,019326	0,014291	0,010651
0,60	1,000000	0,382833	0,203873	0,125134	0,083359	0,058634	0,042316	0,031869	0,024317	0,018442
0,65	1,238381	0,495867	0,275060	0,175053	0,120962	0,087418	0,065521	0,050273	0,039771	0,031973
0,70	1,555778	0,649595	0,373016	0,245737	0,174631	0,130218	0,100403	0,079584	0,064188	0,052637
0,75	2,000000	0,866571	0,513670	0,347811	0,253810	0,193700	0,153072	0,124164	0,102274	0,086215
0,80	2,666667	1,194593	0,728884	0,505847	0,377371	0,295159	0,237699	0,196676	0,165374	0,141530
0,85	3,777556	1,745201	1,092353	0,775620	0,590209	0,470463	0,386185	0,325047	0,277880	0,241080
0,90	6,000000	2,851053	1,825846	1,323128	1,025662	0,831181	0,693503	0,592305	0,514198	0,452911

Fuente: Elaboración propia sobre Agerschou (2004)

Ilustración 338. Aproximación para sistemas $M/E_3/N$ (Escala decimal). Fuente: Agerschou (2004).

Fuente: Elaboración propia.

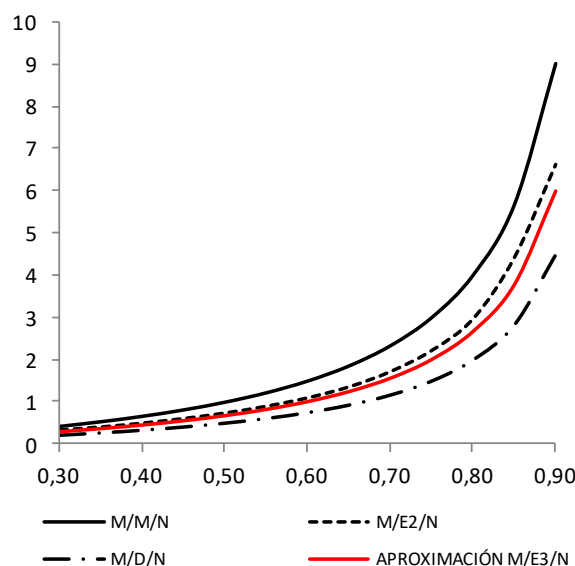
Ilustración 339. Aproximación para sistemas $M/E_3/N$ (Escala logarítmica). Fuente: Agerschou (2004).

Fuente: Elaboración propia.

Efectivamente, si se representa este sistema $M/E_3/N$ bajo la aproximación de Agerschou (2004) y se compara gráficamente con los resultados que se obtienen para los sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y

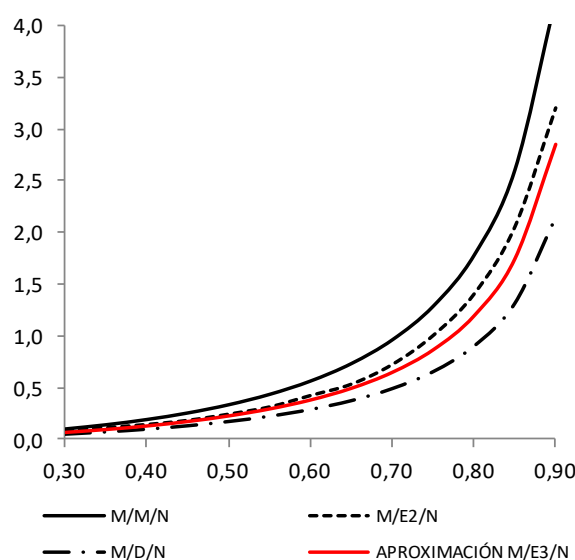
$M/D/N$, se alcanzan unos datos coherentes con los que ya se han apuntado y según los cuales las esperas relativas van disminuyendo (a igual tasa de ocupación) con la fase k de la función Erlang. Este efecto también se observa en la ilustración 340 a 343 para los casos de 1,2, 5 y 10 ataques.

Ilustración 340. Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E_3/N$ y su comparación con los sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y $M/D/N$. Caso 1 ataque.



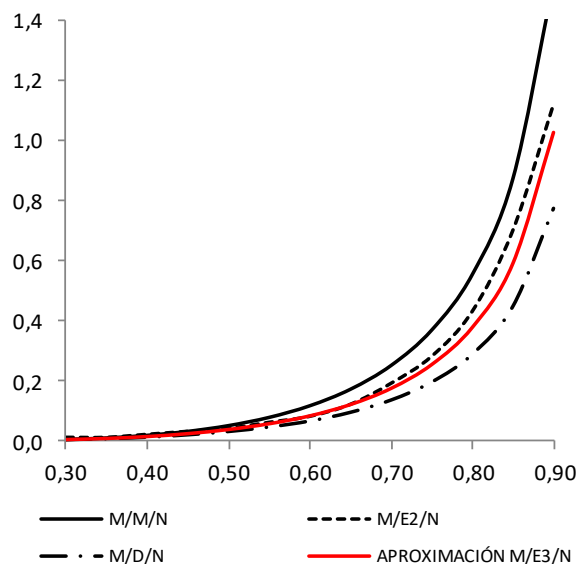
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 341. Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E_3/N$ y su comparación con los sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y $M/D/N$. Caso 2 ataques.



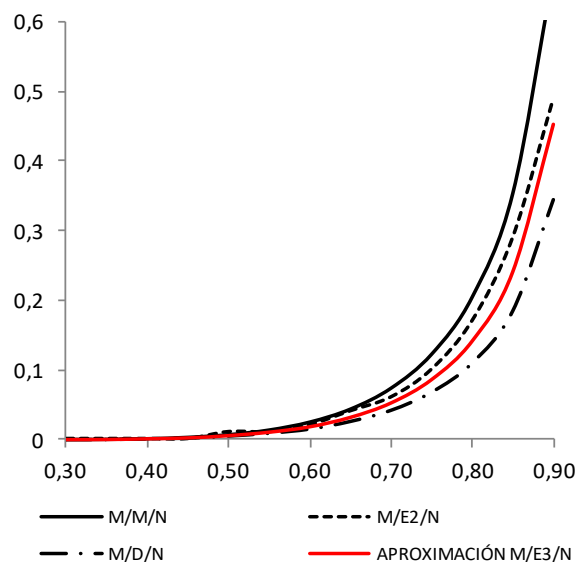
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 342. Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E_3/N$ y su comparación con los sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y $M/D/N$. Caso 5 ataques.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 343. Aproximación de Agerschou (2004) para sistemas $M/E_3/N$ y su comparación con los sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y $M/D/N$. Caso 10 ataques.



Fuente: Elaboración propia.

Además si se particulariza para el caso $N=1$ y se resuelven las ecuaciones exactas que se proporcionan en el apartado 3.1.3 para el caso $k=1$, $k=3$ y $k=\infty$, se llega a esa relación.

Efectivamente, haciendo $N=1$ en la ecuación (15) y teniendo en cuenta las ecuaciones (62) y (63), para los valores indicados ($k=1$, $k=3$ y $k=\infty$) se obtiene:

$$\eta(k=1) = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (95)$$

$$\eta(k=3) = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (96)$$

$$\eta(k=\infty) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (97)$$

Se obtiene que multiplicando por 2 la ecuación:

$$\eta(k=\infty) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (98)$$

y sumándole la ecuación:

$$\eta(k=1) = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (99)$$

dividiendo el resultado por 3:

$$\eta(k=3) = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{2\eta(k=\infty) + \eta(k=1)}{3} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha}}{3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

que de manera simplificada:

$$\eta(k=3) = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (100)$$

Lo que confirma de una manera matemática para el caso de un ataque (y de manera exacta) los resultados aproximados de Agerschou (2004) a dichos sistemas $M/E_3/N$.

4.2.5. Sistemas $E_2/E_2/N$ y $E_3/E_3/N$: Soluciones con ley de llegada y servicio Erlang 2 y 3 y su comparación con sistemas con misma ley de servicio y ley de llegadas aleatorias. Influencia de la regularidad de servicio y llegadas.

El sistema $E_2/E_2/N$ fue estudiado por Page (1972) llevando su aplicación práctica al caso portuario G. De Monie, Director de Ingeniería y Consultoría del Puerto de Amberes (Bélgica), en el monográfico de la UNCTAD “*Measuring and evaluating port performance and productivity*” (UNCTAD, 1987)³⁶⁸ y siendo de utilidad en algunos casos que ya se han apuntado en puntos anteriores como los que corresponden a terminales de graneles especializados pero con una variación amplia de tamaño de buques servidos.

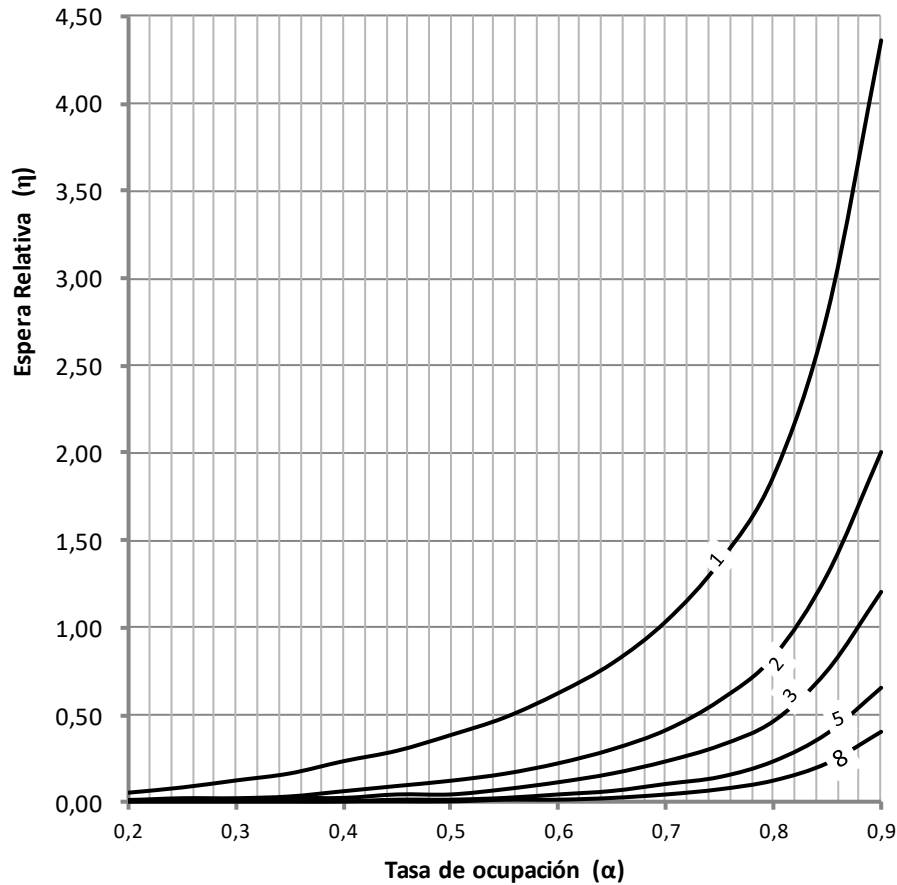
Los valores de espera relativa, conforme las presentaron dichos autores se puede ver en la tabla 57, así como su representación gráfica que se incluye en la ilustración 344.

³⁶⁸ Esta monografía es posteriormente traducida al castellano en UNCTAD (1988).

Tabla 57. Espera Relativa Sistema $E_2/E_2/N$.

Tasa de Ocupación (α)	Espera Relativa Sistema $E_2/E_2/N$							
	Número de Atravesamientos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,15	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,20	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,30	0,13	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,35	0,17	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
0,40	0,24	0,06	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
0,45	0,30	0,09	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
0,50	0,39	0,12	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00
0,55	0,49	0,16	0,07	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01
0,60	0,63	0,22	0,11	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01
0,65	0,80	0,30	0,16	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02
0,70	1,04	0,41	0,23	0,14	0,10	0,07	0,05	0,04
0,75	1,38	0,58	0,32	0,21	0,14	0,11	0,08	0,07
0,80	1,87	0,83	0,46	0,33	0,23	0,19	0,14	0,12
0,85	2,80	1,30	0,75	0,55	0,39	0,34	0,26	0,22
0,90	4,36	2,00	1,20	0,92	0,65	0,57	0,44	0,40

Fuente: UNCTAD (1987), página 155.

Ilustración 344. Esperas relativas en función del número de atraques (Sistemas $E_2/E_2/n$).

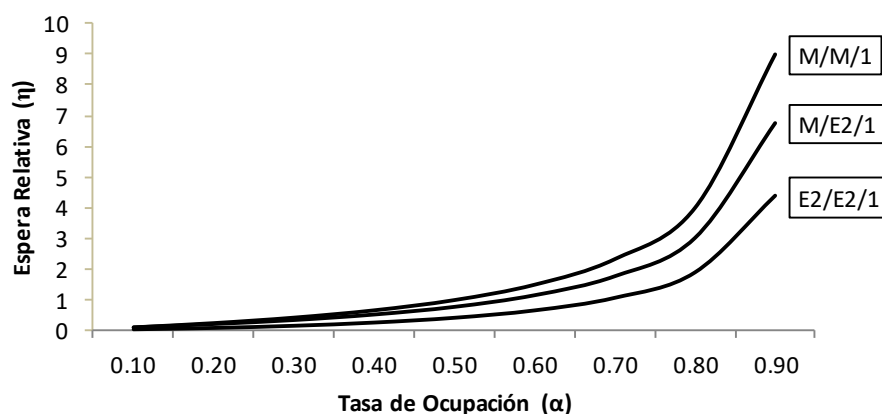
Fuente: Elaboración propia.

Este último ejemplo, y por comparación con los anteriores, sirve para valorar nuevamente el efecto de la regularidad (tanto en el tiempo de servicio como en la programación de atraques) en la productividad de un puerto (medida ésta en este ejemplo a través de su espera relativa).

En las siguientes gráficas se representa la espera relativa de un sistema $M/M/N$, frente a un $M/E_2/N$ y otro $E_2/E_2/n$, particularizando para uno, dos y cinco atraques; y se observa que sobre el primero (donde tanto la ley de llegadas como la de servicio son exponenciales) la introducción de un cierto factor de “regularidad” u “homogenización” en el tiempo de servicio (sistema $M/E_2/n$) deriva en un descenso de la espera relativa (aproximadamente del 75% en el segundo caso con respecto al primero a partir de tasas de ocupación superiores al 50%) y si, además, se produce la llegada de barcos con cierta programación (sistema $E_2/E_2/n$) se induce un nuevo descenso de la espera relativa (en este caso a partir de tasas de ocupación del 60% la espera relativa de un sistema $E_2/E_2/n$ se mantiene en el rango del 40/50% del sistema puramente markoviano $M/M/n$).

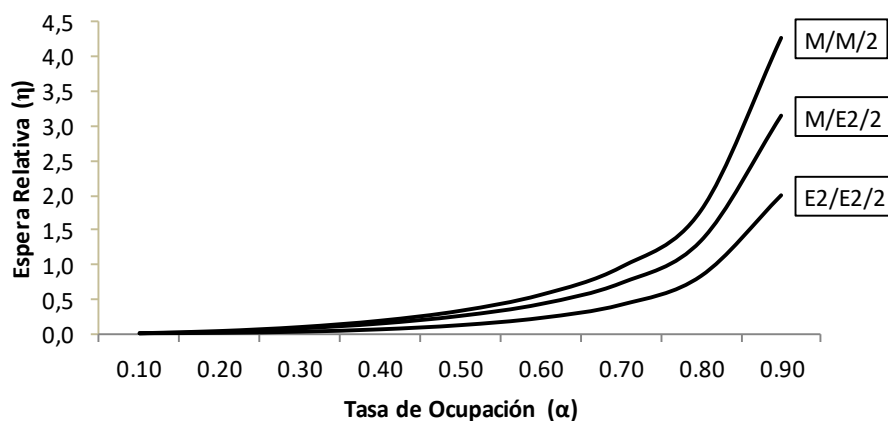
Obviamente, el incremento del número de ataques produce un descenso muy notable de las esperas relativas que se aprecia al observar en la ilustración 345 a 347 la escala del eje de ordenadas que en el primer caso llega hasta $\eta=10$ y en el último a $\eta=1.8$.

Ilustración 345. Análisis comparados de los sistemas M/M/N, M/E₂/N y D/E₂/N. Efecto de la regularidad.
Caso 1 ataque.



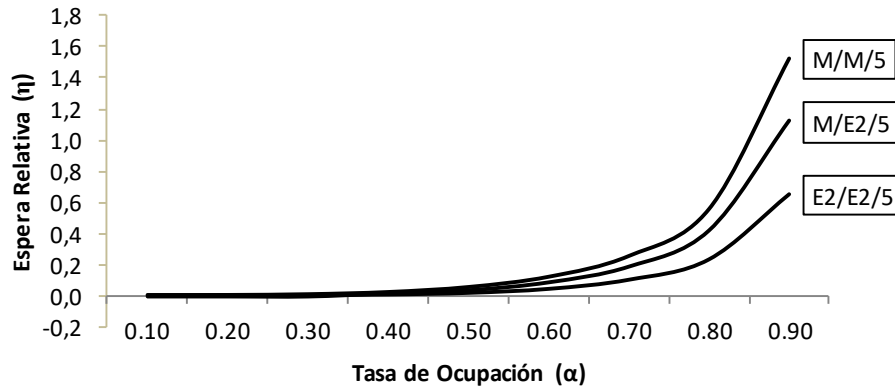
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 346. Análisis comparados de los sistemas M/M/N, M/E₂/N y D/E₂/N. Efecto de la regularidad.
Caso 2 ataques.



Fuente: Elaboración propia.

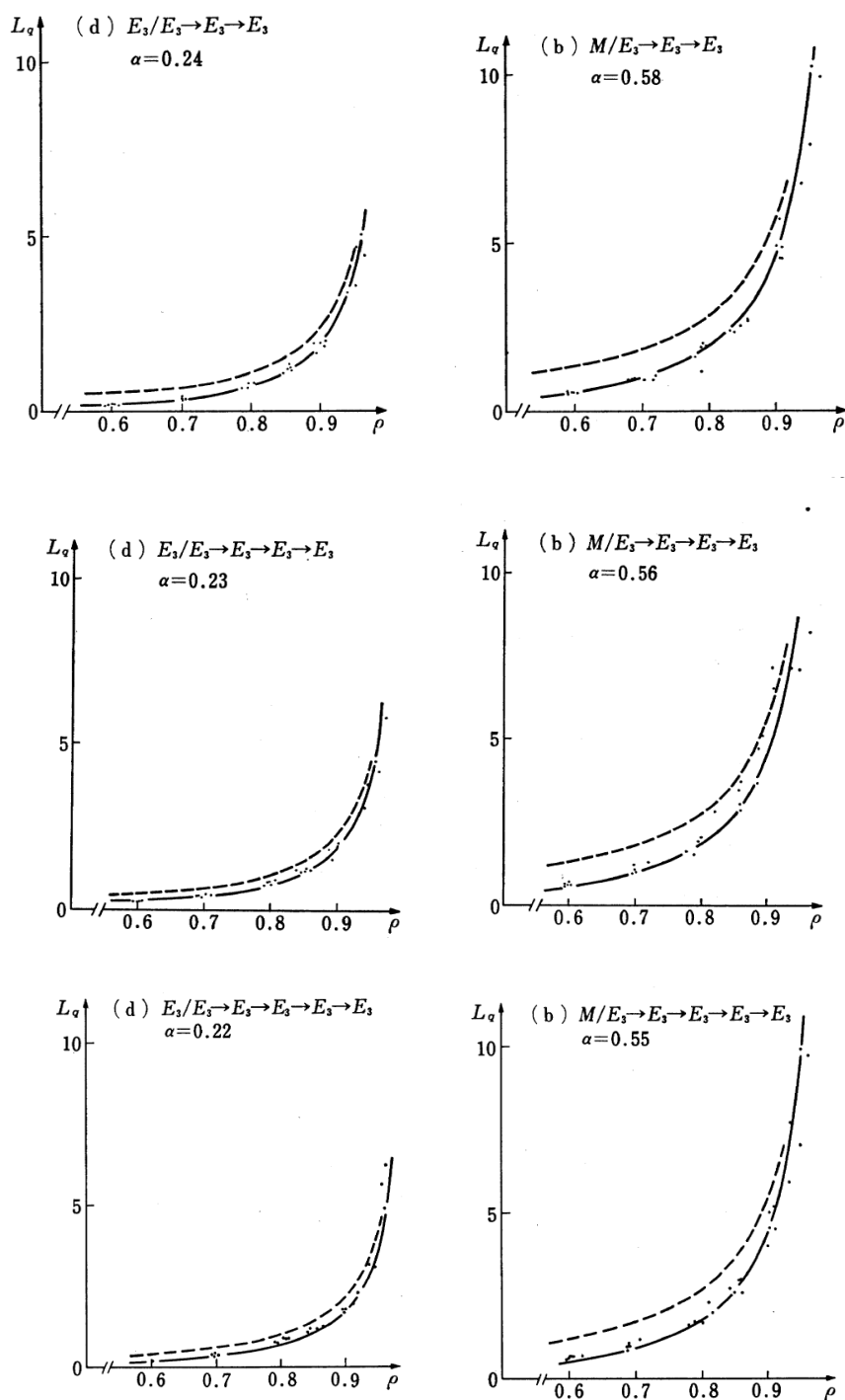
Ilustración 347. Análisis comparados de los sistemas $M/M/N$, $M/E_2/N$ y $D/E_2/N$. Efecto de la regularidad. Caso 5 atraques.



Fuente: Elaboración propia.

De los estudios ya citados de Sakasegawa y Yamazaki (1977) (centrados estos en sistemas de telecomunicaciones y no de puertos) se pueden extraer soluciones aproximadas para sistemas $E_3/E_3/N$ para los casos de 3, 4 y 5 servidores; comparándose además para los mismos casos con distribuciones de llegada Poisson ($M/E_3/N$) y constantes ($D/E_3/N$), ofreciendo además los autores fórmulas de relativa sencilla de aplicación y de suficiente validez para ratios de utilización usuales conforme los ejercicios de simulación que realizaron.

El interés práctico en entornos portuarios es limitado puesto que con carácter general no existen ninguna terminal /puerto que cumpla estas condiciones en cuanto a sus leyes de distribución y por lo que no se reproducen las fórmulas mencionadas por dichos autores; pero si se citan aquí y se muestran algunas gráficas representativas (ilustración 348) puesto que permiten reforzar el concepto que se planteaba con anterioridad según el cual la regularidad en la llegada permite mejorar sustancialmente el servicio, disminuyendo las longitudes medias de barcos en cola.

Ilustración 348. Sistemas $E_3/E_3/N$ y su comparación con sistemas $M/E_3/N$.

Fuente: Sakasegawa y Yamazaki (1977).

5. Modelos de planificación portuaria basados en la congestión:

5.1. Conceptos de tráfico de saturación, tráfico de congestión y tráfico límite.

Como una evolución práctica de la QT en ambientes portuarios algunos autores han desarrollado aplicaciones basadas en los conceptos que denominan tráfico de saturación, tráfico de congestión y tráfico límite.

Dichos estudios han sido recopilados de una manera teórica por Rodriguez (1985) y se basan en el análisis de las curvas de estancia de buque en puerto, que son representaciones en las que en el eje de abscisas se refiere el tráfico movido por el puerto/terminal y en el de ordenadas el tiempo de estancia de buque en puerto (como suma del tiempo en espera más el tiempo en operación).

Conforme los conceptos que se han repasado en la QT, no cabe duda que conforme va aumentándose el grado de ocupación del puerto (" α ") de las instalaciones portuarias, se reciben más barcos, aumentando tanto las esperas relativas (" η ") como el tráfico portuario (" Q ") (toneladas, TEU's,...).

La decisión estratégica pasa por tanto en determinar cuál es volumen de tráfico óptimo (operativa, comercial, económicamente,...) de tal manera que las esperas que se introduce a ese nivel o grado de ocupación sean razonables para los usuarios del puerto.

A este tráfico se le denomina tráfico óptimo o tráfico de diseño (" $Q_{\text{óptimo}}$ " o " $Q_{\text{diseño}}$ ").

En esta estimación es en la que se basan los modelos de congestión, saturación y tráfico límite que se presentan en el presente apartado.

Para realizar el cálculo con los mismos parámetros que se han utilizado en la QT, basta con expresar el tráfico como producto de la intensidad de servicio (" μ ") en días/buque, por 365 días (asumiendo plena operatividad del puerto) o por el número de días que se considere razonable en función de las características del puerto sometido a estudio (con objeto de considerar situaciones no operativas por razones de horarios de trabajo, condiciones climatológicas, mantenimiento programado o no programado, etc...), por el grado de ocupación (" α ") y por el volumen medio de mercancías movido por cada barco, parámetro que se denomina " V_m ".

Obviamente también existirá una ley de distribución en lo que se refiere al parámetro V_m , pero dicha distribución siempre tendrá un volumen medio durante el periodo que se analiza que corresponde al que se denominará en lo sucesivo “buque tipo”.

Siendo “Q” el tráfico del puerto (expresado en Toneladas, TEU’s, vehículos,... o cualquier otra unidad que sea representativa de la terminal sobre la que se esté construyendo la gráfica), la ecuación se representará como el producto anterior, o en función de la frecuencia de llegadas (“ λ ”) en razón de la ecuación (14):

$$\alpha = \lambda / \mu \quad (14)$$

$$Q(\alpha) = \alpha \cdot \mu \cdot 365 \cdot \xi \cdot V_m = \lambda \cdot 365 \cdot V_m \quad (101)$$

Donde ξ es el coeficiente de operatividad del puerto (número de días que el puerto está operativo / 365).

Efectivamente a través de la ecuación anterior queda claro que a medida que crece la tasa de ocupación va aumentando el tráfico (en teoría linealmente suponiendo que los niveles de servicio, frecuencia de llegada, operatividad y volumen medio del barco tipo se mantienen constantes).

A su vez, conforme va creciendo la tasa de ocupación, va creciendo además el tiempo de estancia total del barco en puerto, pues se cumple la relación:

$$W = W_s + W_q = W_s + \eta * W_s = W_s * (1 + \eta) = N / \mu * (1 + \eta) \quad (18)$$

Para calcular el tiempo de estancia se asimila el puerto o terminal con un sistema dentro de los que se han enunciado a lo largo del apartado 3 del presente anejo, con el objetivo de dar los datos de espera relativa que son necesarios para despejar la ecuación anterior.

Dicha espera relativa serán en unos casos una solución exacta (apartado 3.1) mientras que en otros casos un valor aproximado (apartado 3.2).

Por lo tanto es posible construir gráficas las gráficas de estancia (Q/W) (equivalente a una gráfica Q/α) realizando los cálculos necesarios a través de las expresiones (18) y (102) anteriores.

En la ilustración 349 se ha representado esta relación de una manera teórica y en la misma se observa como la evolución del tiempo de estancia de un buque en un puerto o terminal cobra una apariencia similar a las curvas de espera relativa / tasa de ocupación que se analizan en apartados anteriores.

Efectivamente, cuando el tráfico es nulo el barco llega a puerto y nada más hacerlo procede a su atraque pues no hay ningún atraque ocupado ni cola en el sistema. El tiempo total ha de coincidir con el tiempo de servicio (W_s), ya que el tiempo en cola (W_q) es cero.

A medida que el tráfico aumenta (es decir se va aumentando la tasa de ocupación) la curva crece pues lo va haciendo el tiempo de espera (W_q).

Siendo así, los tiempos de servicio (W) crecen en principio con una pendiente muy suave (pues a bajas tasas de ocupación los tiempos en cola son igualmente pequeños y con bajo gradiente) y al final con una pendiente mucho más elevada (los tiempos en cola empiezan a crecer exponencialmente con la tasa de ocupación) hasta que, en teoría, se hacen infinito para un determinado nivel de tráfico de entrada al puerto.

A este nivel de tráfico el sistema se desestabiliza y se producen unas esperas infinitas ya que la cantidad de barcos que entran en el sistema y solicitan atraque es tal que, antes de que termine la operación de un barco, han llegado nuevos barcos al sistema y la cola de barcos crece continuamente y con ello los tiempos de espera globales.

A este nivel de tráfico se le denomina **tráfico de saturación** (“ Q_s ”).

Se cumple por tanto que:

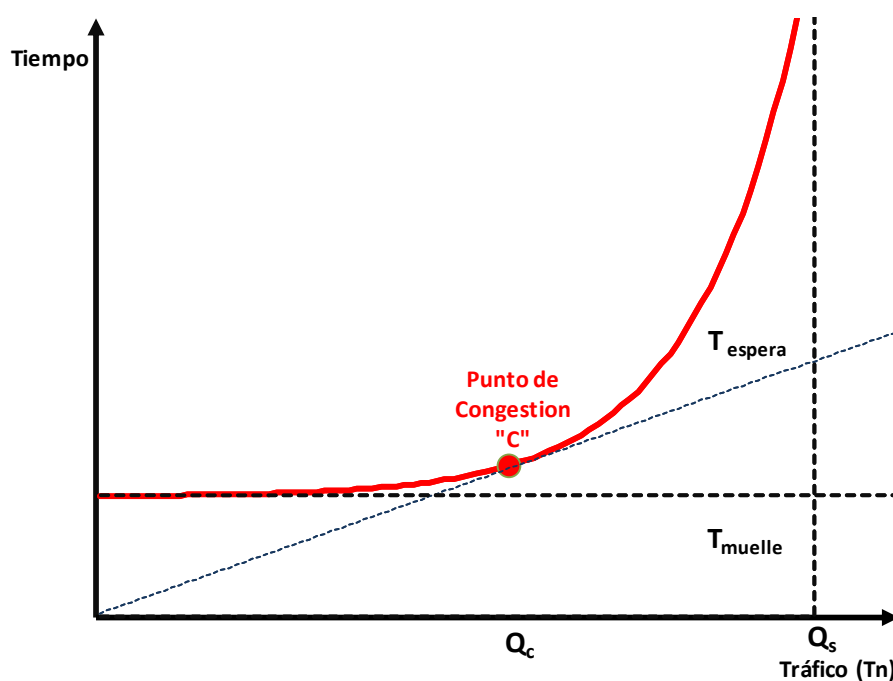
$$Q_s \rightarrow \alpha = 1 \rightarrow \lambda = \mu \quad (102)$$

$$Q_s = \mu \cdot 365 \cdot \xi \cdot V_m = \lambda \cdot 365 \cdot \xi \cdot V_m \text{ (siendo } \lambda = \mu) \quad (103)$$

Sin embargo, antes de alcanzar este teórico tráfico de saturación se encuentra un punto en la curva en el que a pequeños incrementos en los tráficos se producen grandes incrementos en el tiempo del barco en puerto.

Este punto se representa en la ilustración 349 como el punto de tangencia desde el origen a la curva de estancia en puerto y se le denomina **tráfico de congestión** (“ Q_c ”).

Ilustración 349. Definición de tráfico de congestión y tráfico de saturación.



Fuente: Elaboración propia.

Matemáticamente, para obtener valores del tráfico de saturación se debe considerar la ecuación (18) y, según el desarrollo presentado por Rodríguez (1985), considerando que α / μ es constante, operar con las siguientes expresiones:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\delta\eta}{\delta\alpha} - \frac{1+\eta}{\alpha^2} = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\delta\eta}{\delta\alpha} - \frac{1+\eta}{\alpha} \right] \quad (104)$$

O su equivalente:

$$\frac{\delta\eta}{\delta\alpha} = \frac{1+\eta}{\alpha} \quad (105)$$

Ecuación que se resuelve analíticamente para aquellas soluciones en las que se cuenta con soluciones exactas en la QT o, mediante tanteos que hagan mínimo el factor $(1 + \eta) / \alpha$ en aquellos otros casos donde no se disponga de soluciones exactas.

Para éstos últimos casos Rodríguez (1985) compiló en forma de tablas soluciones para los sistemas con leyes de llegada exponencial y cualquier número de ataques y ley de servicio $(M/G(Z)/N)$ y para sistemas de un ataque y leyes de llegada o servicio cualesquiera (sistema $G(\gamma)/G(Z)/1$).

Las tablas para estos sistemas (tabla 58 y tabla 59) se muestran a continuación recomendando dicho autor afectar los resultados por un factor de seguridad de 0,90 para tener en consideración que dichos resultados son aproximados.

Para el caso de leyes de llegada exponencial (M) y cualquier ley de servicio $G(\gamma)$ y número de ataques (sistema $M/G/N$) los resultados serían:

Tabla 58. Tasas de congestión para sistemas con ley de llegadas exponencial (M) y cualquier ley de servicio $G(\gamma)$ y número de atraques (sistema M/G/N).

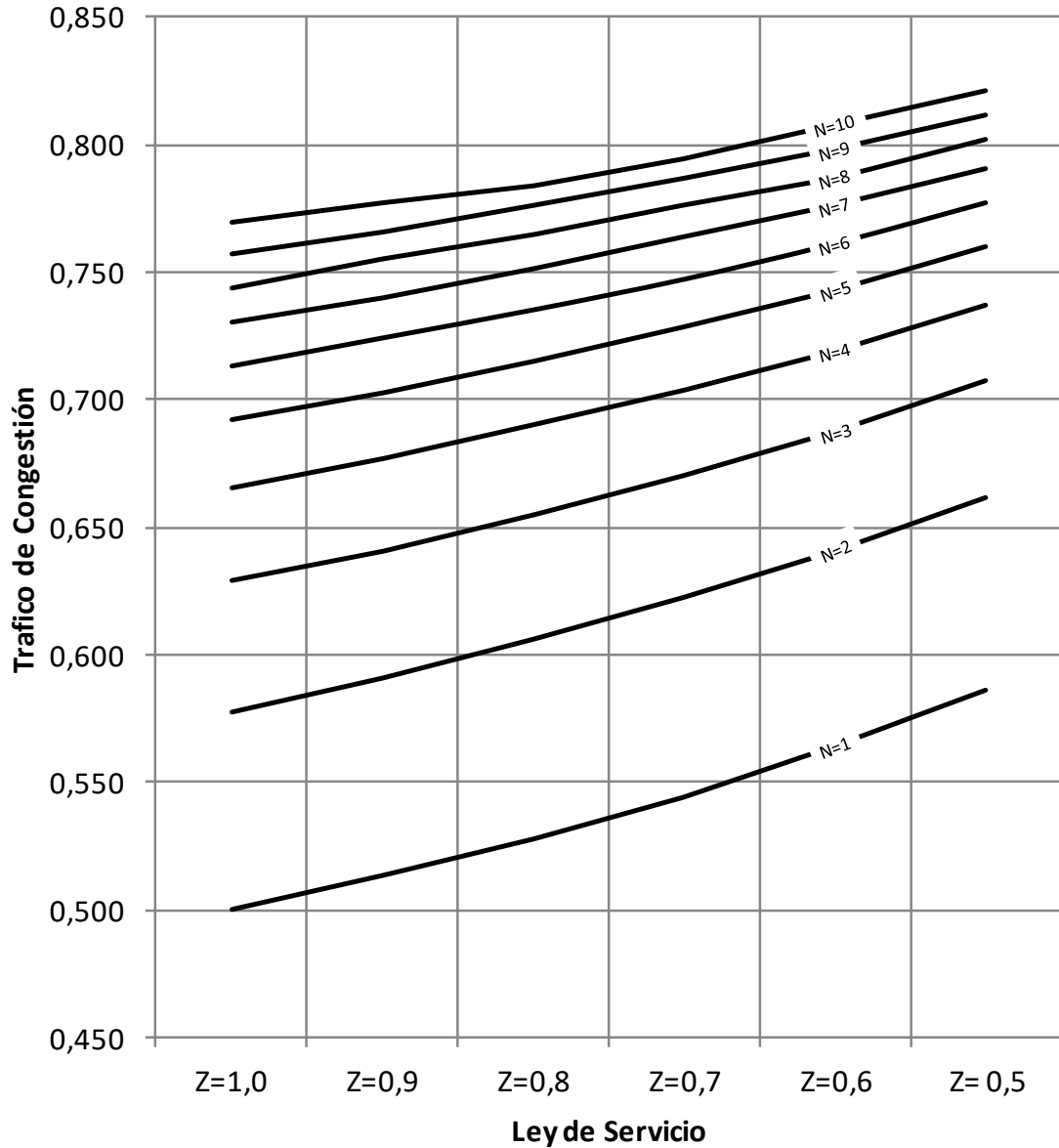
Tasas de congestión para leyes de llegada exponencial (M) y cualquier ley de servicio $G(\gamma)$ y número de atraques (sistema M/G/N)											
N (Número de Atraques)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z	1,0	0,500	0,577	0,629	0,665	0,692	0,713	0,730	0,744	0,757	0,770
	0,9	0,513	0,591	0,641	0,677	0,703	0,724	0,740	0,755	0,766	0,777
	0,8	0,528	0,606	0,655	0,690	0,715	0,735	0,751	0,765	0,776	0,784
	0,7	0,544	0,622	0,670	0,704	0,728	0,747	0,764	0,776	0,787	0,794
	0,6	0,564	0,641	0,687	0,719	0,743	0,761	0,776	0,787	0,798	0,808
	,5	0,586	0,662	0,707	0,737	0,760	0,777	0,791	0,802	0,812	0,821

Fuente: Rodríguez (1985).

Si se representa la tabla 58 de una manera gráfica (ilustración 350) para una mejor comprensión de los resultados se llega a dos conclusiones:

- A mayor número de atraque mayor es el grado de congestión permitido teniendo un gradiente de crecimiento decelerado (es decir cuanto mayor es N, más cercana están las curvas de tasa de congestión de dicho sistema y su siguiente con N+1 atraques).
- Cuanto más constante es la ley de servicio de un sistema (conviene recordar que los límites se obtienen con $Z = \frac{1}{2}$ en cuyo caso el servicio era puramente constante o determinista y $Z=1$ en cuyo caso el sistema es Markoviano o Exponencial) mayores son las tasas de ocupación que conducen a situaciones de congestión (es decir las gráficas presentan un crecimiento a medida que decrece el factor “Z”).

Ilustración 350. Tráfico e congestión para sistemas con ley de llegadas exponencial (M) y cualquier ley de servicio $G(\gamma)$ y número de atraques (sistema M/G/N).



Fuente: Elaboración propia basado en Rodríguez (1985).

Para el caso de cualquier ley de llegadas $G(z)$ y de servicio $G(\gamma)$ pero con un único atraque. (Sistema $G(\gamma)/G(Z)/1$) los resultados serían:

Tabla 59. Tasas de congestión para cualquier ley de entrada $G(z)$ y de servicio $G(\gamma)$. Único Atraque. Sistema $G(\gamma)/G(Z)/1$.

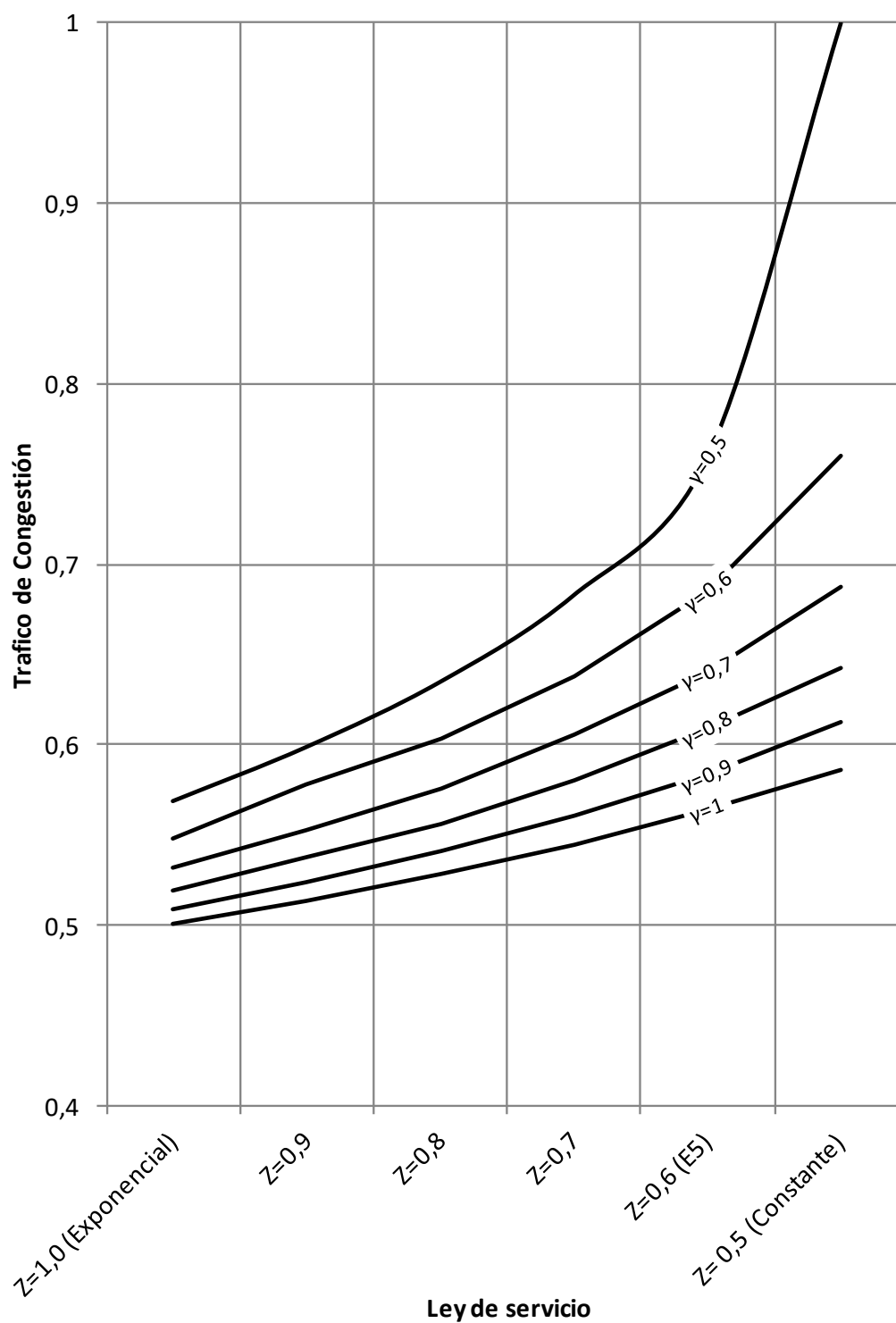
		Tasas de congestión para cualquier ley de llegadas $G(z)$ y de servicio $G(\gamma)$. Único Atraque. Sistema $G(\gamma)/G(Z)/1$					
		γ					
		1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Z	1,0	0,500	0,509	0,519	0,532	0,548	0,569
	0,9	0,513	0,524	0,537	0,552	0,578	0,599
	0,8	0,528	0,541	0,556	0,576	0,603	0,635
	0,7	0,544	0,560	0,580	0,606	0,638	0,683
	0,6	0,564	0,583	0,609	0,640	0,685	0,759
	0,5	0,586	0,612	0,642	0,687	0,760	1,000

Fuente: Rodríguez (1985).

Representado la tabla 59 de una manera gráfica para una mejor comprensión de los resultados (ilustración 351), se llega a una idéntica conclusión en el sentido de que cuanto más constante es la ley de llegadas (o la ley de servicio) mayores grados de utilización se permiten para llegar a situaciones de congestión.

Se observa, además, como en el hipotético caso límite en que fuesen constantes tanto la ley de llegadas ($\gamma = 1/2$) como la de servicio ($Z = 1/2$) la tasa de ocupación que llevaría a situaciones de congestión es del 100% y en este caso $Q_s = Q_c$.

Ilustración 351. Tasas de congestión para cualquier ley de llegadas $G(z)$ y de servicio $G(\gamma)$. Único Atrache. Sistema $G(\gamma)/G(Z)/1$.



Fuente: Elaboración propia basado en Rodríguez (1985).

A partir de aquí, se introduce otro concepto que se denomina tráfico límite (“ Q_L ”) y que corresponde con el nivel de tráfico de un puerto / terminal a partir del cual los usuarios se deciden por otra opción logística (otro puerto, modo de transporte,...) apareciendo tráficos desviados o sustitutivos.

Se podría por tanto asimilar el tráfico límite (“ Q_L ”) con el que antes se ha denominado tráfico de diseño u óptimo (“ $Q_{\text{diseño}}$ ” o “ $Q_{\text{óptimo}}$ ”).

El tráfico límite ya no puede deducirse de ninguna formulación matemática pues corresponde a un criterio subjetivo en el que intervienen multitud de variables como tipo de tráfico, alternativas logísticas y costes de las mismas en comparación a nuestro puerto, regularidad de los servicios, etc... Este nivel de tráfico es, en esencia, un límite que cada usuario se impone y que no es fijo entre unos y otros clientes del puerto, ni tampoco lo es en el tiempo para un mismo usuario, ni entre diferentes puertos.

Históricamente y de manera general se ha venido admitiendo como simplificación que el tráfico límite debiera ser un cinco por ciento superior al de congestión ($Q_L = 1,05 \cdot Q_c$), mientras que otros autores (Rodríguez, 1985) lo relacionan directamente con el tráfico de saturación sugiriendo que, con cierto margen de seguridad, es un 80% del mismo (es decir $Q_L = 0,8 \cdot Q_s$).

Ambas aproximaciones se incluyen como referencia pero estudios específicos sobre este concepto deben basarse, y no cabe más remedio, bien en la experiencia del gestor portuario para con sus usuarios y conocimiento de su puerto y de la competencia; bien con estudios de mercado específicos o análisis de situaciones concreta de desvíos en un puerto; o bien en procedimientos más complejos que pasan por evaluar los costes totales de la cadena logística de un determinado tráfico en mi puerto (costes portuarios incluidos las esperas y los costes de estancia de la mercancía en puerto, más otros costes logísticos al margen de los portuarios como son los costes de transporte terrestre o por tubería hasta el destino o desde el origen de la mercancía) y compararlos con los costes de otras alternativas (costes portuarios más otros costes de la cadena logística asociada a dichas alternativas).

Efectivamente, aunque sólo sea de una manera conceptual es lógico pensar que los tráficos regulares admiten menos esperas que los tráficos *tramp*. Por lo tanto, a igualdad de otras variables, el tráfico límite debe ser menor en los primeros que los segundos.

También parece razonable pensar que las esperas que un usuario está dispuesto a admitir están conectados con el tiempo de servicio y que por tanto la espera relativa es de *per sé* un buen indicador de cuál es el tráfico límite.

En línea con esto, el borrador de las Recomendaciones de Obras Marítimas (“ROM”) promovidas por el Ente Público Puertos del Estado del Ministerio de Fomento del Gobierno de España y en

concreto el contenido en González (2006)³⁶⁹ recomienda como criterio de diseño que los tiempos de espera no sean superiores al 10% del tiempo de servicio en tráficos regulares, del 25% en tráficos mixtos y del 50% en tráficos *tramp*. En base a estos datos y tomando como referencia los estudios de la QT sugiere incluso un grado de ocupación máximo en función del tipo de tráfico y el número de ataques. Este procedimiento de cálculo coincide conceptualmente con el grado de ocupación asociado al tráfico límite. La tabla que presentan es la siguiente:

Tabla 60. Grado de Ocupación Máximo recomendado

Número de ataques ("N")	Grado de Ocupación Máximo Recomendado		
	Tráficos regulares ($W_q = 0,10 W_s$)	Tráficos mixtos ($W_q = 0,25 W_s$)	Tráficos <i>tramp</i> ($W_q = 0,50 W_s$)
1	15%	25%	40%
2	35%	50%	60%
3	50%	60%	70%
4	55%	65%	75%
5	60%	70%	80%
6	65%	75%	85%
8	70%	80%	88%
9 o más	75%	85%	90%

Fuente: González (2006)

Como se puede observar en la tabla anterior transcrita literalmente de la fuente mencionada existe seguramente un error tipográfico ya que no se incluye la fila para 7 ataques, no siendo los escalones propuestos entre 6 a 8 y entre 8 a 9 coherente con el comportamiento exponencial de las esperas en función del número de ataques.

Por ello, se sugiere que en el caso de que se desee utilizar como referencia la tabla de González (2006) para calcular el tráfico límite se modifiquen las dos últimas filas en el siguiente sentido:

³⁶⁹ Este documento se trata del borrador del capítulo 3 de lo que más tarde se convertiría en R.O.M 2.0-2011 para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre (EPPE, 2012)

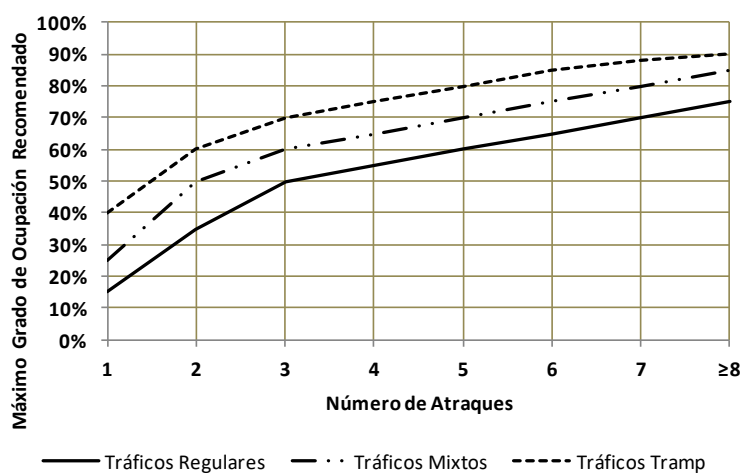
Tabla 61. Grado de Ocupación Máximo recomendado.

Número de atraques ("N")	Grado de Ocupación Máximo Recomendado		
	Tráficos regulares ($W_q = 0,10 W_s$)	Tráficos mixtos ($W_q = 0,25 W_s$)	Tráficos <i>tramp</i> ($W_q = 0,50 W_s$)
1	15%	25%	40%
2	35%	50%	60%
3	50%	60%	70%
4	55%	65%	75%
5	60%	70%	80%
6	65%	75%	85%
7	70%	80%	88%
8 o más	75%	85%	90%

Fuente: Elaboración propia. Modificación sugerida por el autor de esta tesis sobre los trabajos González (2006).

Los valores anteriores se representan de manera gráfica en la ilustración 352.

Ilustración 352. Máximo Grado de Ocupación recomendado.



Fuente: Modificación sugerida por el autor sobre los trabajos González (2006).

Previamente a los estudios de la González (2006), Tsinker (2004) había incluido una tabla en la que correlacionaba lo que llamaba el factor de ocupación con lo que denominaba factor de congestión y en el que daba para cada número de atraques una banda superior e inferior.

La tabla de dicho autor se presenta a continuación:

Tabla 62. Factor de Ocupación conectado con el Factor de Congestión.

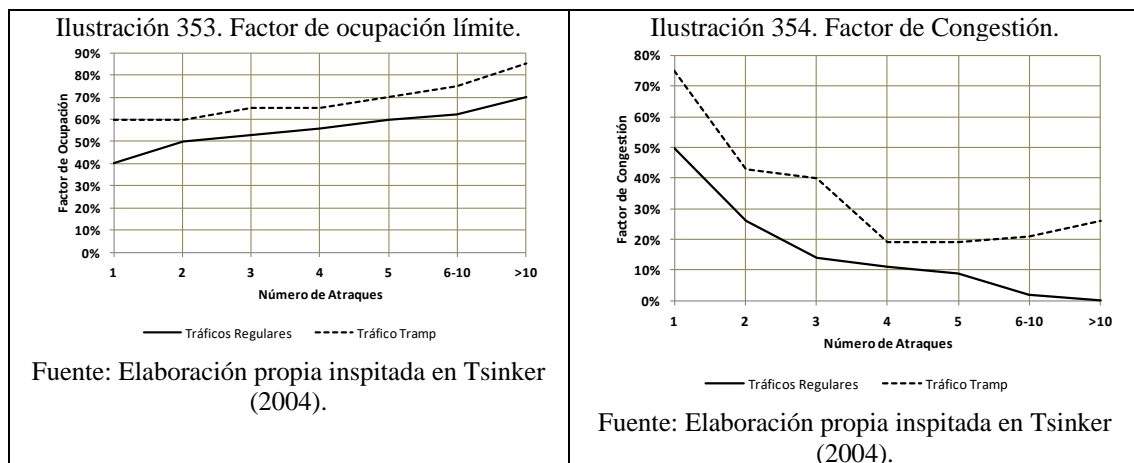
Número de ataques N	Factor de Ocupación		Factor de Congestión	
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo
1	40%	60%	50%	75%
2	50%	60%	26%	43%
3	53%	65%	14%	40%
4	56%	65%	11%	19%
5	60%	70%	9%	19%
6-10	62%	75%	2%	21%
≥ 8	70%	85%	0%	26%

Fuente: Tsinker (2004)

De esta tabla, aunque implícitamente no lo indica, se interpreta que la banda inferior debe ser la que se aplique a tráficos puramente regulares y la banda superior a tráficos puramente *tramp*, utilizando valores medios para estructuras de tráficos mixtos.

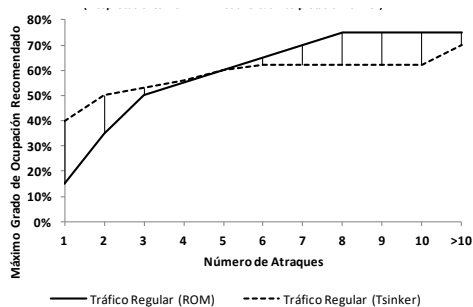
De igual modo se entiende que el factor de ocupación que indica es conceptualmente el mismo que introduce González (2006), es decir, el grado de ocupación conectado con el tráfico límite.

Se representa a continuación bajo esta interpretación los datos de Tsinker (2004).



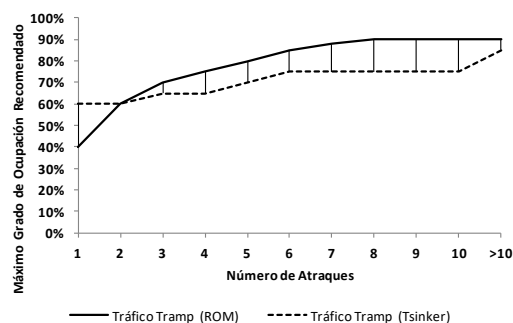
Si se comparan las propuestas de ambas fuentes se pone de manifiesto que, como norma general, González (2006) permite tasas de ocupación más altas como referencia a tráficos límite para el caso de tráficos *tramp* (excepción hecha del caso de 1 ataque) (ilustración 356) mientras que sugiere valores más bajos para tráficos regulares hasta el caso de 4 ataques, momento a partir vuelve a sugerir la utilización de tasas de ocupación más altas (ilustración 355).

Ilustración 355. Comparación de recomendaciones de grado de ocupación para tráficos regulares González (2006) versus Tsinker (2004).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 356. Comparación de recomendaciones de grado de ocupación para tráficos *tramp* González (2006) versus Tsinker (2004).



Fuente: Elaboración propia.

Sea cual fuere, una vez que se ha definido el concepto de máximo grado de ocupación recomendado, que también se denomina grado de ocupación límite (α_L), el cálculo del tráfico límite (Q_L) sería expresado mediante la siguiente ecuación:

$$Q_L = \alpha_L \cdot \mu \cdot 365 \cdot \xi \cdot V_m \quad (106)$$

Donde α_L se puede extraer de la tabla 61 admitiendo como referencia González (2006), o, de la tabla 62 si se toman válidos los datos de Tsinker (2004).

Llegados a este punto se puede enunciar un par de propiedades en cuanto al tráfico límite que resultan de las conclusiones a las que se llega tras la discusión teórica de diferentes sistemas en los apartados anteriores y para lo que se debe recordar la ecuación que expresaba el tiempo en sistema de un barco (y con ello el tiempo de estancia)

$$W = W_s + W_q = W_s + \eta \cdot w_s = w_s \cdot (1 + \eta) = N / \mu \cdot (1 + \eta) \quad (18)$$

- Enunciado 1: Para el mismo número de atraques, **el tráfico límite será tanto mayor cuanto más regular sea el sistema** (en llegadas o servicio manteniendo la otra distribución sin variar) en tanto que las curvas de espera relativa van descendiendo con la fase k de la distribución desde máximas esperas (sistema aleatorio o markoviano con $k=1$) hasta mínimas esperas de los sistemas deterministas (función Erlang en el límite $k=\infty$).

Si la curva va descendiendo el punto de tangencia desde el origen se va desplazando necesariamente a la derecha (mayores tráficos o tasas de ocupación).

Efectivamente en la ecuación (18) si se mantiene un mismo número de ataques ($N=\text{constante}$) y se cumple que la espera de un servicio de un sistema de orden k (η_k) es siempre menor que la de un sistema de orden $k-1$ (η_{k-1}) (algo que ya se ha comprobado) los tiempos medios de servicio también irán decreciendo para misma tasa de ocupación ($\eta_k < \eta_{k-1} \rightarrow W_k < W_{k-1}$) al estar las dos variables en relación lineal del factor (N/μ).

- Enunciado 2: *Para la misma ley de llegadas y servicio, el tráfico límite será tanto mayor cuanto mayor sea el número de ataques en tanto que la espera relativa va decreciendo con el número de ataques y por tanto la tangente desde el origen se va desplazando hacia la derecha (mayor tráfico).*

Matemáticamente este enunciado no es inmediato puesto que el tiempo de estancia (W) crecería con el número de ataques (para igual espera relativa) pero en realidad la espera relativa decrece con el número de ataques. Por lo tanto sería necesario demostrar en la ecuación (18) que el decrecimiento que introduce en el tiempo de estancia la espera relativa (y con ello del factor $1+\eta$) es mayor que el crecimiento que impone en la misma ecuación el número de ataques; algo que por el carácter aproximado de algunas soluciones no puede universalizarse desde la perspectiva puramente matemática pero que si se ha comprobado que se cumple con el análisis de las curvas en todos los diferentes sistemas que han sido estudiados en todo el rango de sistemas desde $k=1$ hasta $k=\infty$.

5.2. Ejemplo de aplicación práctica de cálculo de tráficos de saturación, congestión y límite.

Con el objetivo de presentar un ejemplo práctico de aplicación en el cálculo de los tráficos de saturación y congestión usando a su vez los conceptos explicados en la QT, se calcula a continuación la curva de capacidad para dos sistemas portuarios distintos en los que, por simplificar, se considera el máximo grado de operatividad en ambos casos ($\xi=1$):

- 1) El primero corresponde a una terminal de graneles especializado y con un único ataque.

Conforme la información que se resume en la tabla 35, dicho sistema se puede representar mediante un sistema $E_2/E_2/1$, admitiendo como buenos los estudios que referencian este tipo de terminales como los de la UNCTAD (1979 y 1985) o Vianen *et al.* (2012). Los datos, ecuaciones y datos que se utilizan para esta terminal son los siguientes:

- Sistema: $E_2/E_2/1$;

- V_m (tonelaje medio o del buque tipo): 70.000 toneladas;
- Esperanza Relativa (η): Solución aproximada conforme Page (1972) como recogidas por Monie (UNCTAD, 1976) (tabla 57) ;
- Intensidad de servicio: $\mu = 0,4$ buques / día;
- Ley de Tráficos: $Q(\alpha) = \alpha \cdot \mu \cdot 365 \cdot \xi \cdot V_m = \lambda \cdot 365 \cdot V_m$ (102) ;
- Tiempo en sistema: $W = W_s + W_q = W_s + \eta \cdot W_s = W_s \cdot (1 + \eta) = N / \mu \cdot (1 + \eta)$ (18) ;
- Tráfico de Saturación: $Q_s = \mu \cdot 365 \cdot V_m = 0,4 \cdot 365 \cdot 70.000 = 10,22$ millones Tn.

2) El segundo corresponde a una terminal polivalente de mercancía general de un atraque.

Dicho sistema puede aproximarse conforme El – Naggar (2010) a un sistema $M/E_3/1$. En este caso:

- Sistema: $M/E_3/1$;
- V_m (tonelaje medio o del buque tipo): 10.000 Toneladas;

- Esperanza Relativa (η) $\eta = \frac{1+3}{2 \cdot 3} \frac{\alpha}{1-\alpha}$,

Solución exacta de un sistema $M/E_k/1$ que resulta de hacer $k=3$ en la ecuación (62);

- Intensidad de servicio: $\mu = 2$ buques / día;
- Ley de Tráficos: $Q(\alpha) = \alpha \cdot \mu \cdot 365 \cdot \xi \cdot V_m = \lambda \cdot 365 \cdot V_m$ (102);
- Tiempo en sistema (o de estancia) $W = \mu^{-1} + \frac{1+3}{2 \cdot 3} \frac{\alpha \cdot \mu^{-1}}{1-\alpha}$;

Correspondiente a la solución exacta de un sistema $M/E_k/1$ que resulta de hacer $k=3$ en la ecuación (64);

- Tráfico de Saturación: $Q_s = \mu \cdot 365 \cdot V_m = 2 \cdot 365 \cdot 10.000 = 7,30$ millones Tn.

En base a dichas ecuaciones se calculan los valores de tráfico (Q) y tiempo en sistema (W) en función de la tasa de ocupación / espera relativa que se muestran a continuación:

Terminal de Graneles especializado

Sistema	$E_2/E_2/1$	
$\mu=$	0,4	buques/día
$V_m=$	70.000	Tons/buque
$N=$	1	atraques

Tasa de Ocupación (α)	Espera relativa (η)	Trafico (Q)	Tiempo en sistema (estancia) (W)
0,00	0,00	0,000	2,5
0,10	0,02	1,022	2,55
0,15	0,03	1,533	2,575
0,20	0,06	2,044	2,65
0,25	0,09	2,555	2,725
0,30	0,13	3,066	2,825
0,35	0,17	3,577	2,925
0,40	0,24	4,088	3,1
0,45	0,3	4,599	3,25
0,50	0,39	5,11	3,475
0,55	0,49	5,621	3,725
0,60	0,63	6,132	4,075
0,65	0,8	6,643	4,5
0,70	1,04	7,154	5,1
0,75	1,38	7,665	5,95
0,80	1,87	8,176	7,175
0,85	2,8	8,687	9,5
0,90	4,36	9,198	13,4

Terminal Polivalente

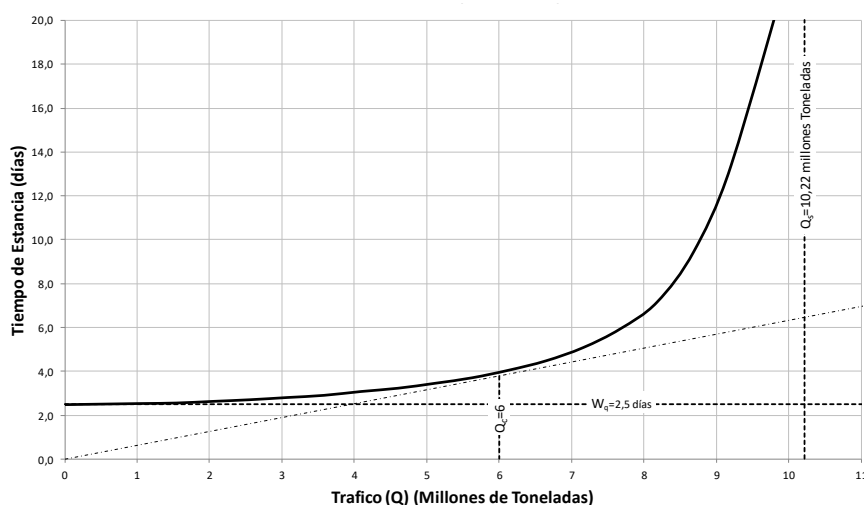
Sistema	$M/E_3/1$	
$\mu=$	2	buques/día
$V_m=$	10.000	Tons/buque
$N=$	1	atraques

Tasa de Ocupación (α)	Espera relativa (η)	Trafico (Q)	Tiempo en sistema (estancia) (W)
0,00	0,000	0,000	0,5
0,10	0,0741	0,73	0,5
0,15	0,1176	1,095	0,6
0,20	0,1667	1,46	0,6
0,25	0,2222	1,825	0,6
0,30	0,2857	2,19	0,6
0,35	0,3590	2,555	0,7
0,40	0,4444	2,92	0,7
0,45	0,5455	3,285	0,8
0,50	0,6667	3,65	0,8
0,55	0,8148	4,015	0,9
0,60	1,0000	4,38	1,0
0,65	1,2381	4,745	1,1
0,70	1,5556	5,11	1,3
0,75	2,0000	5,475	1,5
0,80	2,6667	5,84	1,8
0,85	3,7778	6,205	2,4
0,90	6,0000	6,57	3,5
0,91	6,7407	6,643	3,9
0,92	7,6667	6,716	4,3
0,93	8,8571	6,789	4,9
0,94	10,4444	6,862	5,7
0,95	12,6667	6,935	6,8
0,96	16,0000	7,008	8,5
0,97	21,5556	7,081	11,3
0,98	32,6667	7,154	16,8
0,99	66,0000	7,227	33,5

Y con los datos de la tabla se pueden representar las gráficas de tiempo de estancia para ambas terminales y con ello calcular el tráfico de congestión trazando la tangente desde origen.

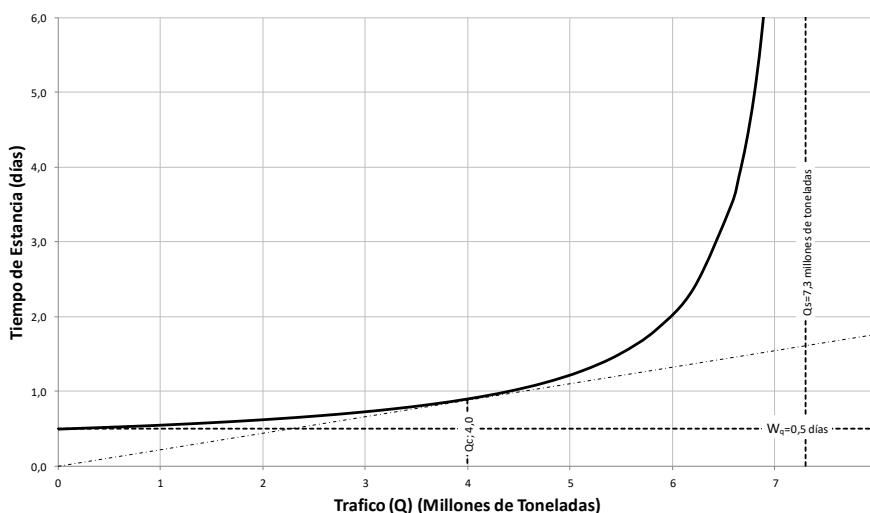
Para el primer caso se obtiene que $Q_s \approx 6,0$ millones de toneladas (ilustración 357) y, en el segundo, $Q_s \approx 4,0$ millones de toneladas (ilustración 358).

Ilustración 357. Cálculo gráfico de tráfico límite y curva de estancia en una terminal de graneles de un atraque.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 358. Cálculo gráfico de tráfico límite y curva de estancia en una terminal de terminal polivalente de un atraque.



Fuente: Elaboración propia.

Como se ha indicado algunos autores consideran el tráfico límite en el entorno del 80% del de saturación ($0,8 \cdot Q_s$) mientras que otros lo cifran en un 5% más del tráfico de congestión ($1,05 \cdot Q_c$). Con ello, en este ejemplo se obtendrían valores que, en el caso de terminales de graneles,

oscilarían entre un amplio margen de $6,3^{370}$ y $9,0^{371}$ millones de toneladas y en el caso de la terminal polivalente entre $4,2^{372}$ y $5,6^{373}$ millones de toneladas.

Siguiendo las indicaciones de González (2006), se obtendrían los siguientes datos para el tráfico límite, con nada más que sustituir los valores en la ecuación (107) y tomando como grado de ocupación límite (α_L) un valor del 40% correspondiente al caso de un atraque y tráficos *tramp* (de mejor aplicación en el caso de terminales públicas como las indicadas) (dato extraído de la tabla 61).

- Terminal Público de Graneles: $Q_L = 40\% \cdot 0,4 \cdot 365 \cdot 70.000 \approx 4,1$ millones de toneladas.
- Terminal Pública Polivalente: $Q_L = 40\% \cdot 2 \cdot 365 \cdot 10.000 \approx 2,9$ millones de toneladas.

Si se toma como referencia Tsinker (2004), se obtienen los siguientes datos para el tráfico límite, utilizando un grado de ocupación límite (α_L) de valor del 60% correspondiente al caso de un atraque y tráficos *tramp* de la tabla 62.

- Terminal Público de Graneles: $Q_L = 60\% \cdot 0,4 \cdot 365 \cdot 70.000 \approx 6,1$ millones de toneladas.
- Terminal Pública Polivalente: $Q_L = 60\% \cdot 2 \cdot 365 \cdot 10.000 \approx 4,4$ millones de toneladas.

Nótese que para estos casos de un atraque González (2006) está proponiendo una relación del tipo $Q_L = 40\% Q_s$, mientras que Tsinker (2004) lo hace del tipo $Q_L = 60\% Q_s$ bien lejos del 80% que se ha comentado que han venido sido referenciados por algunos autores con criterio general y que González y Tsinker nunca recomiendan para el caso de tráficos regulares y sólo para el caso de tráficos *tramp* a partir de un número elevado de atraques (5 en el caso de Tsinker y 8 en el caso de González) valores de tal orden de magnitud.

En lo que se refiere a su relación con el tráfico de congestión, en el caso de González (2006) y siguiendo con este ejemplo práctico se obtendrían relaciones del tipo $Q_L \approx 0'7 Q_c$, muy lejos del propuesto con carácter general bajo la expresión $Q_L = 1'05 Q_c$.

Bajo la formulación de Tsinker (2004) se obtendrían expresiones $Q_L = 1'02 Q_s$ para el caso de la terminal de graneles y $Q_L = 1'10 Q_c$ para el caso de la terminal polivalente; valores mucho más alineados con éste.

³⁷⁰ $6,3=1,05 \cdot 6,0$

³⁷¹ $9,0=0,8 \cdot 11,22$

³⁷² $4,2=1,05 \cdot 4,0$

³⁷³ $5,6=0,8 \cdot 7,3$

A continuación se presentan los resultados del ejercicio práctico anterior:

	Formulación González (2006)				
	Q_L	Q_c	Q_s	Q_L/Q_c	Q_L/Q_s
Terminal de Graneles Público Especializado	4,1 millones Toneladas	6,0 millones Toneladas	10,2 millones Toneladas	68%	40%
Terminal Polivalente	2,9 millones Toneladas	4,0 millones Toneladas	7,3 millones Toneladas	73%	40%
	Formulación Tsinker (2004)				
	Q_L	Q_c	Q_s	Q_L/Q_c	Q_L/Q_s
Terminal de Graneles Público Especializado	6,1 millones Toneladas	6,0 millones Toneladas	10,2 millones Toneladas	102%	60%
Terminal Polivalente Pólivalente	4,4 millones Toneladas	4,0 millones Toneladas	7,3 millones Toneladas	110%	60%

5.3. Enfoque al tráfico de congestión conforme las Recomendaciones de Obras Marítimas (EPPE; 2016). Método Simplificado.

Cabe destacar que con posterioridad a González (2006) y Tsinker (2004), el Ente Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento del Gobierno de España) publicó la definitiva ROM 2.1-2011 destinada a servir de apoyo en el dimensionamiento de obras de atraque y amarre (EPPE, 2012).

En este documento se ofrece una importante revisión de los conceptos tratados por sus antecesores; proponiendo una tabla de triple entrada para obtener la tasa máxima de ocupación recomendable en función de:

1) la espera relativa: a umbrales de 0.10, 0.25 y 0.50 según el tipo de tráfico (regular – *tramp*) que pretenda moverse por el muelle o terminal,

2) tipo de sistema en cuanto a los tiempos de servicio (variando desde los clásicos M/M/n y pasando por los M/E₂/n, M/E₄/n y M/D/n) y

3) número de atraques.

Esta tabla, permite de una manera simplificada, obtener con relativa rapidez datos numéricos para un abanico amplio de casos pero siempre considerando distribuciones entre llegadas aleatorias o markovianas. Los resultados se reflejan en la ilustración 359.

Ilustración 359. Tasa de Ocupación recomienda en función del número de atraques, espera relativa y tipo de sistema.

Tabla 3.2.1.2. Tasa de ocupación (Φ) correspondiente a los sistemas de esperas más característicos en las instalaciones de atraque, para esperas relativas (τ) de 0.10, 0.25 y 0.50

PARA ESPERA RELATIVA (τ) DE 0.10										
CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE ESPERAS	TASA DE OCUPACIÓN (Φ)									
	NÚMERO DE ATRAQUES (N_a)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M/G_1/N_a$ y $M/G_\infty/N_a$ (Tráficos unitarios muy heterogéneos o totalmente homogéneos)	0,09	0,30	0,44	0,52	0,58	0,63	0,66	0,69	0,71	0,73
$M/G_2/N_a$ (Tráficos unitarios relativamente heterogéneos)	0,07	0,28	0,40	0,49	0,55	0,60	0,63	0,66	0,68	0,71
$M/G_4/N_a$ (Tráficos unitarios relativamente homogéneos)	0,08	0,29	0,41	0,50	0,56	0,61	0,64	0,67	0,69	0,72
PARA ESPERA RELATIVA (τ) DE 0.25										
CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE ESPERAS	TASA DE OCUPACIÓN (Φ)									
	NÚMERO DE ATRAQUES (N_a)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M/G_1/N_a$ y $M/G_\infty/N_a$ (Tráficos unitarios muy heterogéneos o totalmente homogéneos)	0,20	0,45	0,57	0,65	0,70	0,74	0,77	0,79	0,80	0,82
$M/G_2/N_a$ (Tráficos unitarios relativamente heterogéneos)	0,17	0,43	0,54	0,62	0,67	0,71	0,75	0,77	0,78	0,81
$M/G_4/N_a$ (Tráficos unitarios relativamente homogéneos)	0,18	0,44	0,55	0,63	0,69	0,72	0,76	0,78	0,79	0,81
PARA ESPERA RELATIVA (τ) DE 0.50										
CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE ESPERAS	TASA DE OCUPACIÓN (Φ)									
	NÚMERO DE ATRAQUES (N_a)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M/G_1/N_a$ y $M/G_\infty/N_a$ (Tráficos unitarios muy heterogéneos o totalmente homogéneos)	0,33	0,58	0,69	0,75	0,79	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88
$M/G_2/N_a$ (Tráficos unitarios relativamente heterogéneos)	0,29	0,54	0,65	0,72	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85	0,86
$M/G_4/N_a$ (Tráficos unitarios relativamente homogéneos)	0,31	0,56	0,67	0,73	0,77	0,80	0,82	0,84	0,86	0,87
Leyenda $M/G_1/N_a$: Distribución de llegadas exponencial / Distribución de tiempos de servicio de componente constante, resultado de la combinación de una componente constante y de una distribución Exponencial. $M/G_2/N_a$: Distribución de llegadas exponencial / Distribución de tiempos de servicio de componente constante, resultado de la combinación de una componente constante y de una distribución Erlang de orden 2. $M/G_4/N_a$: Distribución de llegadas exponencial / Distribución de tiempos de servicio de componente constante, resultado de la combinación de una componente constante y de una distribución Erlang de orden 4. $M/G_\infty/N_a$: Distribución de llegadas exponencial / Distribución de tiempos de servicio de componente constante, resultado de la combinación de una componente constante y de una distribución Erlang de orden ∞ .										

Fuente: EPPE (2012).

6. Comparación entre resultados teóricos obtenidos con QT y observaciones reales.

Como se ha apuntado, la aplicación práctica de la QT en ambientes portuarios pasa por adoptar una serie de hipótesis que permitan la aplicación de esta teoría en este caso concreto. Entre estas hipótesis cabe destacar:

- Las leyes de llegadas de buques a puertos y las leyes de servicio siguen distribuciones estadísticas que se comportan razonablemente como una distribución Erlang de orden k (E_k); siendo en la mayoría de los casos procesos markovianos (M); procesos aleatorios Poisson en las llegadas y exponencial negativa en los servicios.
- Los parámetros medios de frecuencia de llegadas (λ) e intensidad de servicio (μ) permanecen constantes en el tiempo e independientes de la tasa de utilización del puerto (α), cumpliéndose en todo momento la relación ($\alpha = \lambda / \mu$).
- Además la intensidad media de servicio (μ) es la misma en cada uno de los “N” atraques o puestos que se definen en el sistema.
- Todos los buques que llegan a puerto permanecen en la cola hasta que son atendidos; o lo que es lo mismo son suficientemente “pacientes” y no abandonan la cola y buscan otra alternativa en el caso de que tengan que soportar esperas.
- El sistema de llegada de buque – asignación de atraque – operación de buque y abandono del sistema sigue una disciplina FIFO y no existen limitaciones en el sistema más allá de la existencia o no de un muelle libre (por citar un ejemplo no se producen esperas adicionales por falta de remolque o no se dilatan los tiempos de servicio por falta de estibadores o grúas).
- No existen limitaciones en cuanto al tamaño de las colas / fondeaderos y todos los barcos que llegan y tiene que esperar pueden hacerlo (bien fondeados, bien en navegación hasta que se les autoriza el atraque o fondeo)

Si bien son numerosos y ya se han citado las investigaciones que han demostrado la primera de las hipótesis (asimilación de ley de llegadas / servicios a funciones de distribución Erlang) y parece razonable a la vista de las políticas de asignación de atraques la aplicación de una disciplina de cola FIFO (excepción hecha de las terminales con programación de *slots*) no se han encontrado tantas referencias que centren sus investigaciones en comprobar el resto de hipótesis.

Dentro de estas, ya se ha citado las observaciones de Vianen *et al.* (2012) en el caso de terminales de graneles sólidos, que ponen en tela de juicio el hecho de que la ley de servicio permanezca constante y concluyen que ésta tiene mucho más que ver con la distribución del tamaño de buques (con tendencia creciente a lo largo del tiempo) y con el hecho de que, por ejemplo, los ritmos de

descarga de un mismo buque se mantienen sólo al 100% de la capacidad teórica hasta un determinado momento de la plancha (desde el inicio de la operación hasta que se ha realizado el 40% de la descarga), descendiendo hasta el 70% de una manera lineal cuando se ha realizado aproximadamente el 75% de la descarga y en una nueva línea recta hasta el 20% hasta que se completa la descarga (ver ilustración 283).

Estos autores sugieren que, en vez de distribuciones de tiempo de servicio, se utilicen en un futuro distribuciones de tamaño de buques. Sin embargo, los investigadores citados no aportan un contraste o aplicación práctica o una formulación concreta de cómo abordar este problema; quedando sus conclusiones en un plano teórico inicial.

Mucho más reveladoras a nuestro entender son las investigaciones de Jansson y Shneerson (1982) quienes sí que realizaron una comparación entre leyes teóricas calculadas según la QT para unos puertos concretos y los datos reales observados de ocupación y tiempos medios de colas en dichos sistemas portuarios.

En concreto analizaron cuatro sistemas portuarios: puerto de Uddevalla (Suecia) (10 atraques sin especificar si se trata de una terminal polivalente o especializada), puerto de Ashdod (Israel) (13 atraques, tampoco sin especificar dedicación de los mismos), Haifa (Israel) (10 atraques de carga general) y Haifa (Israel) (1 atraque de granos); y se analizaron datos reales de siete años (1967 y 1973).

Sobre la base de asimilación de los mismos a sistemas $M/M/N^{374}$ y en base a datos reales, estudian para distintos niveles de tasa de ocupación los tiempos de espera reales que se producían y se comparaban los mismos con los tiempos de espera esperables bajo la formulación empírica de colas.

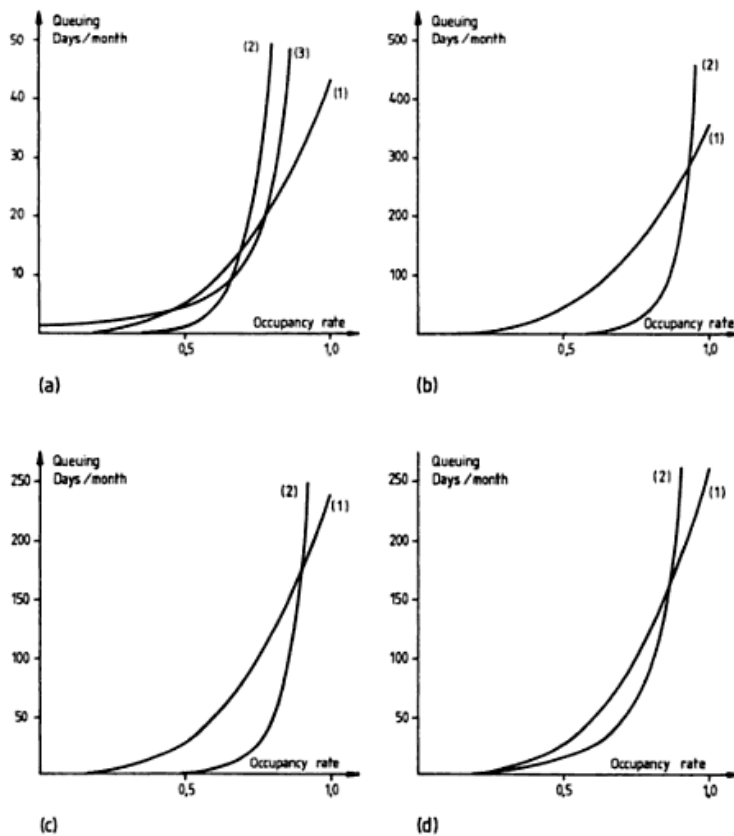
En los cuatro casos los resultados fueron idénticos llegándose a la conclusión que para bajos niveles de ocupación los datos observados estaban siempre por debajo de los teóricos esperados en QT (tiempos de espera menores en la realidad que en la teoría) mientras que a partir de determinados niveles de ocupación (cerca de estados de congestión) ocurría lo contrario y los datos de observación reales estaban por encima de los esperados (tiempos de espera mayores en la realidad que en la teoría).

Siendo así las curvas reales de tiempo de espera – grado de ocupación presentan un menor gradiente (crecimiento más lento) a niveles de tasa de ocupación bajos y mucho mayor (crecimiento más rápido) con niveles de tasa de ocupación altos.

³⁷⁴ No entran a discutir si dichas distribuciones hubieran ajustado mejor a otra función Erlang.

El punto de corte de las curvas reales y teóricas se produce aproximadamente a niveles de tasa de ocupación del 80% (excepción hecha del caso de Uddevalla (Suecia) donde se produce un poco antes en el entorno del 70%), por lo que en base a estos casos prácticos se puede sugerir que, para puertos en los que la tasa de ocupación esté por debajo de niveles de congestión, los datos reales de espera serán menores que los que se esperarían de un planteamiento teórico mientras que para puertos en niveles de congestión seguramente cabría obtener incluso tiempos de espera mayores que los teóricamente calculados en aplicación de la QT.

Ilustración 360. Comparación entre leyes teóricas y observaciones reales de tiempos en cola y grado de ocupación.



5.4 Total queuing time Z as a function of the occupancy rate ϕ in theory and practice: (a) Uddevalla, 10 berths; (b) Ashdod, 13 berths; (c) Haifa, 10 berths (general cargo); (d) Haifa, 1 berth (grain). Curves: (1) empirically estimated relation between Z and ϕ ; (2) relation between Z and ϕ derived from queuing theory; (3) empirically estimated relation between Z and $1 - \phi$.

Fuente: Jansson *et al.* (1982).

El hecho de que no aporten evidencias sobre si hubiese sido mejor otro sistema $E_k/E_k/N$ en vez de un sistema $M/M/N$ podría haber alterado las conclusiones para niveles bajos de tasa de ocupación (toda vez que la espera relativa de un sistema E_k es siempre menor que la de su equivalente M) pero no en tasas de ocupación altas, pues en este caso las esperas relativas de un sistema

markoviano es siempre mayor que la de un sistema E_k , por lo que la discrepancia entre datos reales y observados aún sería mayor y por tanto su conclusión sería completamente válida.

Analizando las causas de dichas desviaciones llegaron a las siguientes interesantes conclusiones que deben ser tenidos en cuenta cuando estas herramientas sean utilizadas en el diseño y/o toma de decisiones:

- No es cierto que los barcos de un sistema portuario sean “infinitamente pacientes” y en algunos casos tienden a abandonar la cola y buscar soluciones alternativas en el caso de que existan esperas. Este hecho hace que las longitudes de las colas y los tiempos de espera reales sean menores que los esperados y esto ocurre como norma general para cualquier grado de ocupación.

Fueron capaces de demostrar este hecho mediante las peticiones de atraque de ciertos buques en ciertos puertos y observando cómo finalmente estos barcos decidieron buscar otras alternativas cuando fueron instruidos para permanecer fondeados a la espera. En concreto vieron como barcos anunciando llegada al puerto de Uddevalla (Suecia) finalmente recalaron en el vecino puerto de Gottenburg (Suecia) por no soportar extracostes de espera.

Parece razonable pensar, a nuestro criterio, que este efecto se pondrá tanto más de manifiesto cuando el extracoste de esperas sea mayor (mayores costes relativos de buque) o cuanto menor diferencia competitiva presente un sistema con respecto a otras alternativas logísticas. Así, cuando se analice un puerto más “asilado” (con menos competencia) o, dicho de otro modo, un tráfico más “cautivo”; este efecto será menos importante que cuando se estudie un puerto donde existan alternativas logísticas cercanas (grado menor de cautividad) y el “coste” del cambio de un puerto a otro sea menor. De igual modo, cuanto más global sea el operador que opera el tráfico (tenga presencia en mayor número de puertos) este riesgo se incrementará.

- No es cierto que las leyes de servicio se comportan con una intensidad de servicio (μ) constante o que los sistemas se comporten sin restricciones por factores más allá de la existencia de atraque libre o no. Según estos autores conforme va aumentando el grado de ocupación de los atraques se producen interferencias entre unos atraques y otros y aparecen cuellos de botella que tienen a aumentar el tiempo de servicio (por ejemplo insuficiencia en el número de grúas o estibadores).

Por lo tanto conforme el grado de utilización es mayor; estas limitaciones, interferencias y cuellos de botella se manifiestan en mayor medida con tendencia a incrementar el tiempo de operación (W_s) por factores exógenos y con ello aumentando el tiempo en cola (W_q).

En el caso de Ashhod (Israel) además indicaron que las observaciones reales estaban claramente “contaminadas” por la alta conflictividad laboral en dicho puerto (gran número de huelgas en el sector de los estibadores) en los años muestrales sometidos a estudio; hecho que si bien no es discutido por los autores, podría explicar a nuestro juicio que la separación entre curvas reales y teóricas sean aún mayor en este puerto que en el resto sometido a análisis, puesto que en este caso la aparición de tráficos desviados se acelera por la incertidumbre que percibe el usuario sobre el tiempo en que tardará en ser atendido y la calidad del servicio que recibirá.

7. Método de la capacidad Económica. Sistema buque-puerto.

7.1. Bases metodológicas de los métodos de capacidad económica.

Como una evolución de la QT dentro del campo portuario surgió una escuela de investigación que abandonando un enfoque exclusivamente centrado en el buque y sus costes asociados (análisis de tiempos de espera, tráficos de cogestión o límite como parámetros de discusión) trataba de buscar el mínimo del coste total como suma de los costes portuarios y del buque, ampliando el enfoque de los indicadores que servían de base para el análisis.

Estos métodos son conocidos como **métodos de la capacidad económica** o de optimización del sistema buque-puerto y tienen como primeras referencias teóricas los artículos de Nicolau (1967), Wanhill (1974a) y de Weille y Ray (1974) y los estudios publicados por Naciones Unidas y concretamente los ya citados “*Port Development: a Handbook for Planners in Developing Countries*”, (UNCTAD, 1979 y 1985) y “*Measuring and evaluating port performance and productivity*” (UNCTAD, 1987 y 1988).

Estos métodos se basan en la confección de las curvas de costes unitarios del buque y del puerto y, por suma de ambas, la obtención de los puntos de mínimo coste global para cada determinado volumen de tráfico y bajo la premisa de encontrar un punto de equilibrio económicamente razonable entre el deseo de un operador o cliente de puerto (al que le gustaría proceder directamente al atraque sin demoras o estancias en cola) y el del gestor portuario (al que le gustaría minimizar los costes de capital asociados a la construcción de nuevos atraques asegurando un mínimo de ocupación en los atraques ya existentes).

Como es lógico los costes del puerto tienen unos costes fijos y hundidos independientes del volumen de tráfico movido (costes de capital: amortización y costes de financiación de la

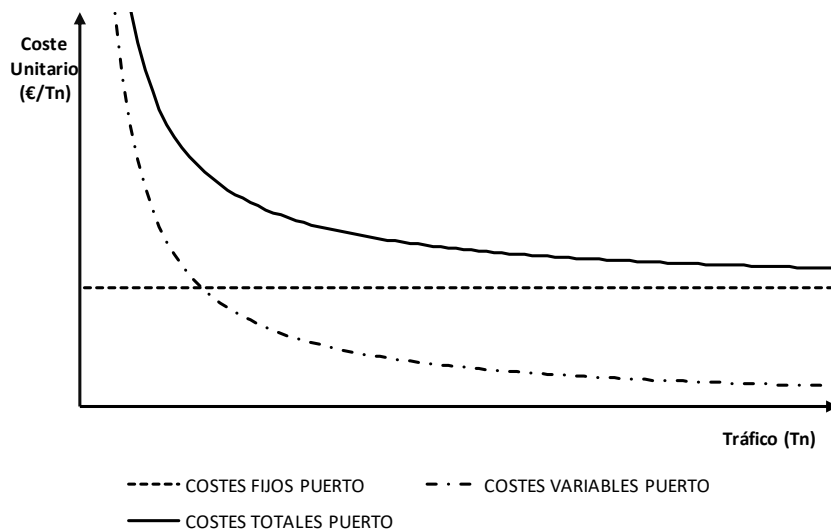
construcción de las infraestructura por ejemplo) y otros componentes variables en función del tráfico que se mueve por el mismo (consumos eléctricos de las grúas asociados a las descargas o gastos de conservación por citar otro ejemplo).

Estos costes unitarios tienden a infinito en el caso de que el tráfico sea cero (al estar el tráfico en el denominador de costes unitarios) y tiende a cero conforme el tráfico aumente (ya que en el límite con tráfico teórico real infinito el coste unitario sea cero).

Obviamente este último caso (tráfico infinito) no puede darse y el mínimo coste portuario debe darse a la capacidad teórica máxima del mismo, o lo que es lo mismo con $\alpha=1$ correspondiendo al tráfico de saturación (“ Q_s ”) que se ha definido en el apartado 4.1 de este anejo.

Siendo así los costes portuarios pueden representarse desde un punto de vista teórico como en la siguiente gráfica (ilustración 361).

Ilustración 361. Costes unitarios de puerto en función del volumen de tráfico.



Fuente: Elaboración propia.

Y, matemáticamente, podría construirse la ecuación:

$$C_p = C_{f,p} + C_{v,p} \quad (107)$$

Donde,

C_p = Costes portuarios asociados a la operación de un buque.

$C_{f,p}$ = Costes fijos portuarios asociados a la operación de un buque.

$C_{v,p}$ = Costes variables portuarios asociados a la operación de un buque.

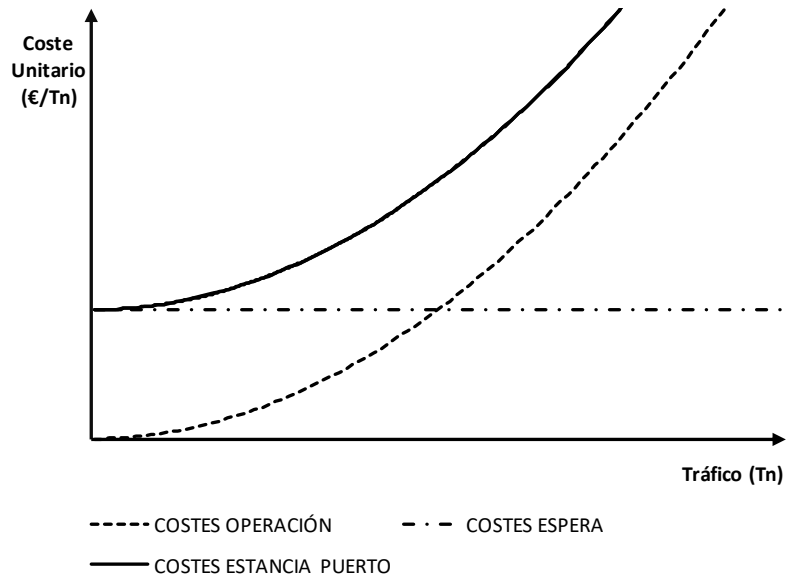
Por el contrario los costes de estancia en puerto de un determinado barco también presentan una componente fija como los consumos en operación, los costes del flete asociado al tiempo de servicio (en el que se incluyen conceptualmente la amortización del buque, coste de personal a bordo, gastos generales y financieros de la empresa naviera en el tiempo mínimo de operación,...), las cuentas de escala (incluyendo facturas por servicios portuarios y tasas cobradas por la Autoridad Portuaria), etc... y otros costes variables (fundamentalmente los costes del flete, consumos u otros gastos asociados a los tiempos de espera del buque).

Los costes de estancia total serían la suma de ambos; de tal modo que el mínimo se alcanza con tráfico cero o lo que es lo mismo cuando el tiempo de espera es cero (y por tanto su coste) y sólo se tiene en cuenta el tiempo de servicio (es decir cuando un barco llega a puerto y sin demora de ninguna clase proceda a su atraque, operación y desatraque sólo incurriendo en costes de operación).

La componente variable, que representa los costes de espera es una curva creciente con el tráfico, que partiendo de cero (si el tráfico es nulo todo barco que llegue al puerto puede proceder directamente a completar su operación sin ninguna demora y no se introducen extracostes de espera) es creciente con el tráfico, ya que a mayores volúmenes de tráfico la probabilidad de que existan interferencias con otras operaciones es mayor y con ello los tiempo de espera van aumentando.

Los costes de estancia toman entonces la forma que se presenta en la ilustración 362.

Ilustración 362. Costes unitarios de estancia de barco en puerto.



Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista analítico se podría utilizar la siguiente expresión:

$$C_b = C_{f,b} + C_{v,b} \quad (108)$$

Donde,

C_b = Costes de estancia del buque en puerto.

$C_{f,b}$ = Costes fijos de estancia del buque en puerto.

$C_{v,b}$ = Costes variables de estancia del buque en puerto.

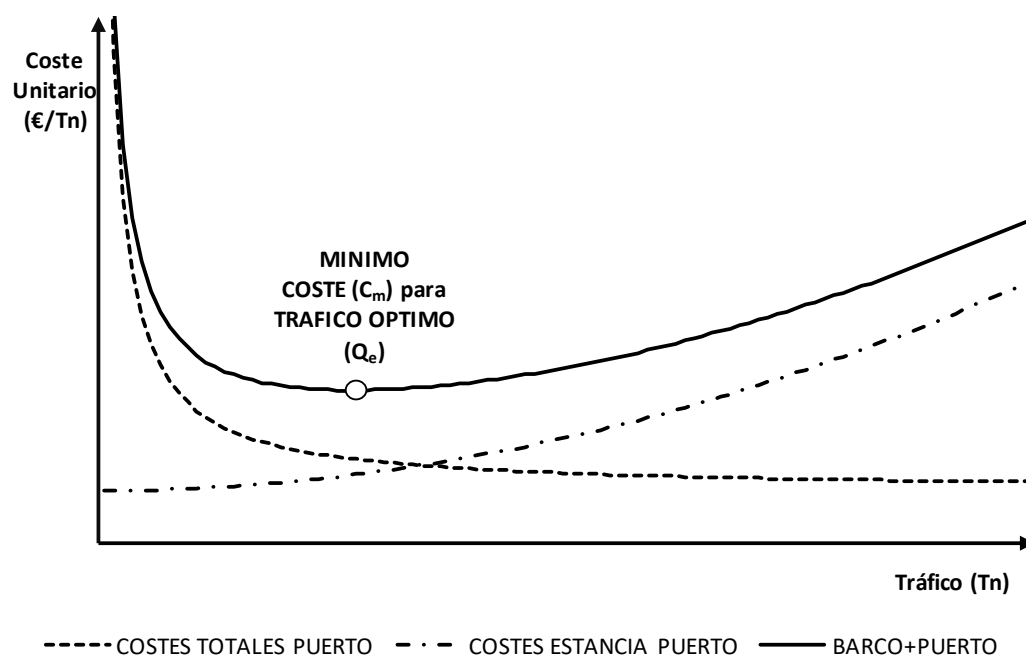
7.2. Tráfico de Equilibrio.

7.2.1. Tráfico de equilibrio para 1 atraque.

Componiendo las dos gráficas anteriores (costes portuarios y costes de estancia del buque) se puede calcular el coste total del sistema buque-puerto, resultando una curva teórica descendente en un principio hasta alcanzar un coste mínimo (" C_m ") correspondiente a un determinado nivel de tráfico de equilibrio (" Q_e "). A partir de este punto el coste vuelve a crecer nuevamente como

consecuencia de los costes crecientes de estancia. Dicho ejercicio se presenta en la ilustración 363.

Ilustración 363. Costes totales del sistema puerto + buque. Definición del coste mínimo y tráfico de equilibrio.



Fuente: Elaboración propia.

Llamando “C” al coste total del sistema portuario:

$$C = C_p + C_b = C_{f,p} + C_{v,p} + C_{f,b} + C_{v,b} \quad (109)$$

y para el cálculo de C_m (mínimo coste) tendría que resolverse la ecuación:

$$C_m \rightarrow \frac{d(C)}{d(Q)} = 0 \quad (110)$$

Si los costes fijos, tanto del buque como el muelle, no dependen del nivel del tráfico, la ecuación anterior podría limitarse a:

$$C_m \rightarrow \frac{d(C_{v,p})}{d(Q)} + \frac{d(C_{v,b})}{d(Q)} = 0 \quad (111)$$

Que es equivalente a decir que el punto de mínimo coste (“ C_m ”) es, matemáticamente, aquel en el que se igualan las pendientes en valor absoluto de los costes del puerto y de estancia.

Al tráfico que determina el mínimo coste se le denomina indistintamente tráfico de equilibrio o tráfico óptimo (“ Q_e ”).

7.2.2. Tráfico de Equilibrio para varios atraques. Curva de planificación óptima de atraques

El análisis anterior se ha realizado bajo el supuesto de que se dispone de un único atraque.

Como es lógico, en el caso de que se disponga de un número creciente de puestos de atraque la curva de coste global se va desplazando a la derecha (es posible atender un mayor tráfico) y el punto de mínimo coste se va desplazando hacia abajo (el coste unitario se va reduciendo siendo el tráfico de equilibrio “ Q_e ” mayor). Es decir, se dan las ecuaciones:

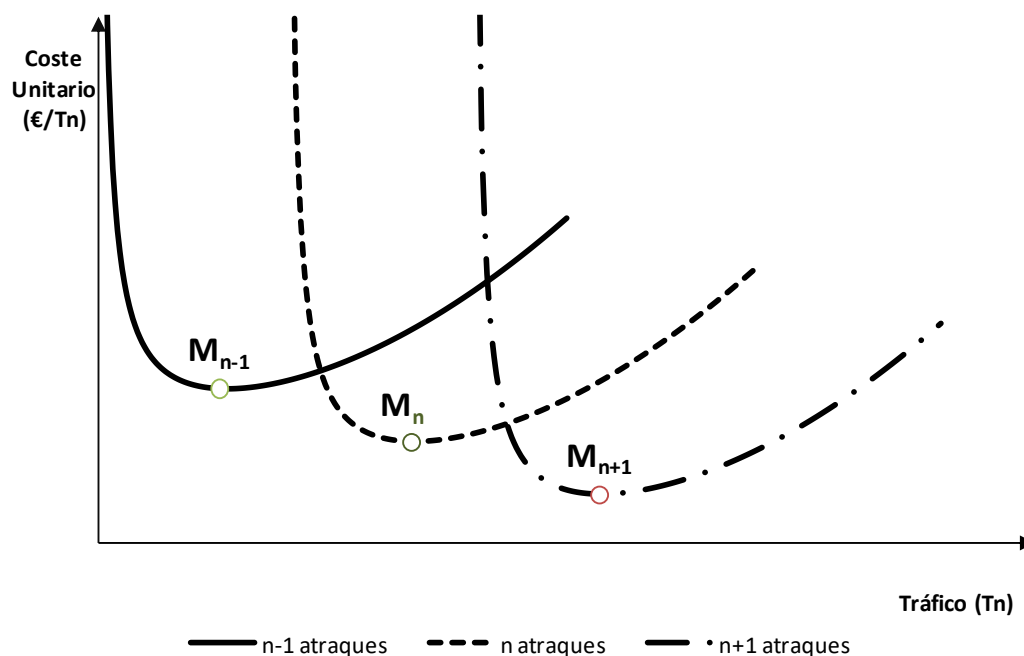
$$C_{m,n \text{ atraques}} > C_{m, n+1 \text{ atraques}} \quad (112)$$

$$Q_{e, n \text{ atraques}} < Q_{e, n+1 \text{ atraques}} \quad (113)$$

Esto tiene que ver con la probabilidad de que un buque espere a su entrada en puerto y el tiempo medio que tiene que permanecer en la cola (“ W_q ”) en función del número de atraques. Efectivamente, como se vio en puntos anteriores, estos parámetros son tanto más bajos cuanto mayor es el número de atraques para un mismo volumen de tráfico.

La representación gráfica del efecto anterior se esquematizada en la ilustración 364.

Ilustración 364. Coste Total Unitario en función del número de atraques.



Fuente: Elaboración propia.

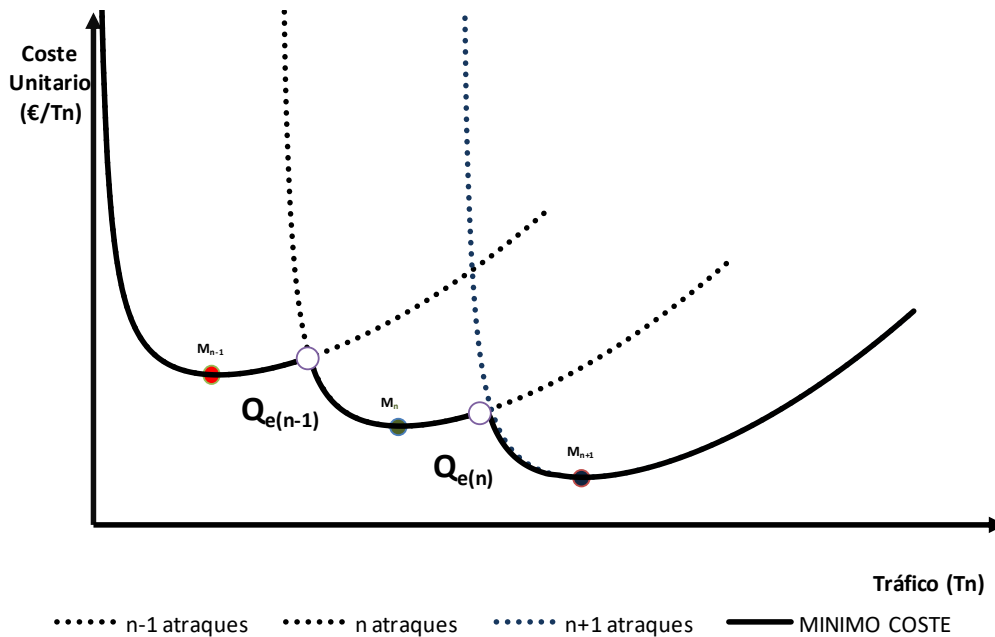
El cálculo de estas gráficas de coste permite además conocer el volumen de tráfico que desde la perspectiva económica justificaría la ejecución de un atraque adicional.

Efectivamente, la envolvente de las curvas anteriores daría la curva de mínimo coste unitario total y los puntos de intersección entre las curvas de coste de un determinado número de atraques y su consecutivo el volumen de tráfico " Q_e " que justificaría la ampliación de capacidad.

En la ilustración 365, el punto $Q_{e(n-1)}$ corresponde con el volumen de tráfico a partir del cual sería lógico pensar en la ejecución de un segundo atraque y el punto $Q_{e(n)}$ el tráfico donde tendría sentido pensar en un tercer atraque.

Dicha curva envolvente puede ser definida como la "curva de planificación óptima de atraques".

Ilustración 365. Curva de planificación óptima de atraques.



Fuente: Elaboración propia.

Rodríguez (1985), presentó este problema teórico desde una perspectiva económica definiendo para ello las siguientes funciones de costes:

- U: Costes variables o de uso del puerto que consideraba prácticamente constantes y asimilaba a los costes de carga / descarga en condiciones medias.
- A: Costes fijos portuarios por unidad de tiempo.
- B: Costes fijos de estancia (Coste de buque) por unidad de tiempo.

Con ello y habiendo definido con anterioridad el cargamento medio (“ V_m ”) se obtiene para un determinado volumen de tráfico (“ Q ”) los siguientes costes unitarios:

○ Costes variables o de servicio de puerto: $C_{v,p} = U$ (114)

○ Costes fijos puerto: $C_{f,p} = A / Q$ (115)

○ Costes de estancia o servicio de buque en puerto: $C_{f,b} = B \cdot W_s / V_m$ (116)

○ Costes de espera de buque en puerto: $C_{v,b} = B \cdot W_q / V_m$ (117)

Con ello, el coste total unitario del sistema buque- puerto (C'') vendría dado por la expresión:

$$C = U + \frac{A}{Q} + \frac{B \cdot W_s}{V_m} + \frac{B \cdot W_q}{V_m} = U + \frac{A}{Q} + \frac{B \cdot (W_s + W_q)}{V_m} = U + \frac{A}{Q} + \frac{B \cdot W}{V_m} \quad (118)$$

Esta expresión también se puede expresar en función de la espera relativa a través de:

$$C = U + \frac{A}{Q} + \frac{B \cdot W_s}{V_m} + \frac{B \cdot W_s \cdot \eta}{V_m} = U + \frac{A}{Q} + \frac{B \cdot W_s}{V_m} \cdot (1 + \eta) \quad (119)$$

Comoquiera además que el número de buques que utiliza un atraque por unidad de tiempo se puede expresar como función de la tasa de ocupación de la siguiente manera:

$$N = \alpha / W_s \quad (120)$$

Y el tráfico movido por un muelle (“Q”) es el número de barcos por su tamaño medio (“V_m”) la ecuación de costes fijos del puerto (ecuación 115) puede sustituirse por:

$$\text{Costes fijos puerto:} \quad C_{f,p} = \frac{A}{Q} = \frac{A}{N \cdot V_m} = \frac{A}{\frac{\alpha}{W_s} \cdot V_m} = \frac{A \cdot W_s}{\alpha \cdot V_m} \quad (121)$$

que se puede sustituir en la ecuación (119) para obtener:

$$C = U + \frac{A \cdot W_s}{\alpha \cdot V_m} + \frac{B \cdot W_s}{V_m} (1 + \eta) = U + \frac{W_s}{V_m} \left(\frac{A}{\alpha} + B(1 + \eta) \right) = U + \frac{B \cdot W_s}{V_m} \left(\frac{A}{B \cdot \alpha} + 1 + \eta \right) \quad (122)$$

Para calcular el nivel de tráfico que justifica el paso de “n” atraques a “n+1” atraques se debiera satisfacer la siguiente ecuación:

$$Q_{e,n} \rightarrow C_n = C_{n+1} \quad (123)$$

y como quiera que tanto los factores “U” como “ $B \cdot W_s / V_m$ ” de la ecuación (122) son independientes del número de ataques ha de darse que:

$$\left(\frac{A}{B \cdot \alpha} + 1 + \eta \right)_n = \left(\frac{A}{B \cdot \alpha} + 1 + \eta \right)_{n+1} \rightarrow \left(\frac{A}{B \cdot \alpha} + \eta \right)_n = \left(\frac{A}{B \cdot \alpha} + \eta \right)_{n+1} \quad (124)$$

La tasa de ocupación sí que depende del número de ataques pero de tal manera que si “ α ” es la tasa de ocupación para “n” ataques la tasa de ocupación para “n+1” ataques es directamente

$$A_{(n+1 \text{ ataques})} = \alpha_{(n \text{ ataques})} \cdot \frac{n}{n+1} \quad (125)$$

Si se denomina la espera relativa para un sistema de “n” ataques y una tasa de ocupación “ α ” como “ $\eta_{\alpha,n}$ ” o simplídicamente “ η_n ”; y la espera relativa de un sistema de “n+1” ataques con tasa de ocupación “ $\alpha+1$ ” como “ $\eta_{\alpha+1,n+1}$ ” o simplídicamente “ η_{n+1} ”, la ecuación (117) podría reescribirse como:

$$\frac{A}{B \cdot \alpha} + \eta_n = \frac{A}{B \cdot \alpha \cdot \frac{n}{n+1}} + \eta_{n+1} \Rightarrow \eta_{n+1} - \eta_n \rightarrow \frac{A}{B \cdot n} = \alpha \cdot (\eta_n - \eta_{n+1}) \quad (126)$$

Conociendo las esperas relativas de un sistema genérico de “n” ataques G/G/n y su siguiente de “n+1” ataques (sistema G/G/n+1) se puede obtener para que tasa de ocupación “ α ” debería plantearse el aumento de capacidad proveyendo de un ataque adicional (a estructura de costes “A” y “B” conocidos).

Un ejemplo simple para su resolución exacta es el de sistemas con leyes de llegada y servicio exponencial (M/M/N) donde se ha proporcionado soluciones a través de las ecuaciones (23), a (29).

Para el sistema de 1 ataque (M/M/1) se había determinado que la espera relativa adquiriría la expresión [$\eta = \alpha / (1-\alpha)$] (ecuación 36) mientras que para el sistema de 2 ataques (M/M/2) la esperanza relativa era [$\eta = \alpha^2 / (1-\alpha^2)$] (ecuación 37).

Con ello, y sustituyendo (36) y (37) en (126):

$$\frac{A}{B \cdot 2} = \alpha \cdot \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} - \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} \right) = \alpha \cdot \left(\frac{\alpha}{(1 - \alpha)} - \frac{\alpha^2}{(1 + \alpha)(1 - \alpha)} \right) = \alpha \cdot \left(\frac{(1 + \alpha) \cdot \alpha - \alpha^2}{(1 + \alpha)(1 - \alpha)} \right) = \left(\frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow A(1 - \alpha^2) = 2 \cdot B \cdot \alpha^2 \rightarrow (A - 2 \cdot B) \cdot \alpha^2 = A \rightarrow \alpha = \sqrt{\frac{A}{A + 2 \cdot B}} = \sqrt{\frac{A/B}{A/B + 2}} \quad (127)$$

Que permite ver como evoluciona la tasa de ocupación a partir del cual se debería construir un segundo atraque en función de la relación entre los costes fijos portuarios y del buque. La curva crece muy rápidamente hasta valores de $\alpha \approx 0.6$ para cualquier valor de $B > A$ ($\rightarrow A/B < 0$) estabilizándose en rangos $\alpha \approx 0.7-0.85$ para valores de A entre el doble y el quíntuple de B (A/B entre 2 y 5) algo que intuitivamente también cobra sentido pues cuanto mayores sean los costes de buque menores tasas de ocupación deben ser permitidas (para minimizar los esperas y sus costes que cobran mayor relevancia con mayores costes de buque).

Ilustración 366. Tasa de ocupación óptima para cambio de 1 a 2 atraques en un sistema con ley de llegadas y servicio exponenciales en función de los costes fijos portuarios y del buque.



Fuente: Elaboración propia.

Más allá de este ejercicio académico o de cualquier otro que se quisiese plantear a través de soluciones analíticas exactas, Rodríguez (1985) proporciona unas tablas aproximadas de doble

entrada para el cálculo de esta tasa de ocupación para el caso de ley de llegadas exponencial y ley de servicio cualquiera (sistema M/G(z)/N) o entrada y servicio cualesquiera pero un único ataque (sistema G(γ)/G(z)/1).

En el primer caso (sistemas con leyes de llegadas exponenciales) se puede entrar con el número de ataques N y un valor que pone en relación los costes de puerto y los costes de buque y que denomina:

$$R = \frac{A}{B \cdot Z} \quad (128)$$

donde conviene recordar que Z era indicador de la función Erlang de tal modo que Z=1 indica una ley de distribución markoviana y, Z= 1/2 una ley de distribución constante.

Tabla 63. Capacidad Económica con Leyes de llegada Exponencial (Sistemas M/G(z)/N).

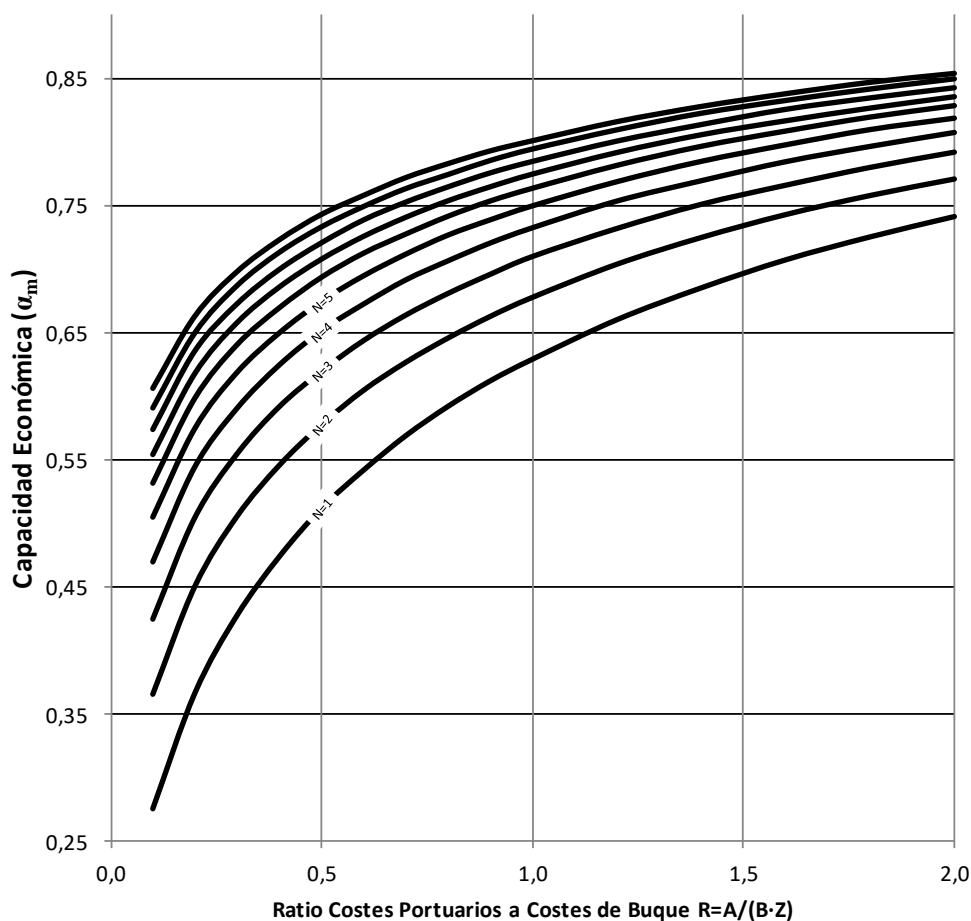
Capacidad Económica con Leyes de llegada Exponencial (Sistemas M/G(z)/N)											
Numero de Ataques											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R = \frac{A}{B \cdot Z}$	0,1	0,276	0,366	0,425	0,469	0,504	0,531	0,554	0,574	0,591	0,606
	0,2	0,367	0,451	0,505	0,544	0,574	0,598	0,618	0,636	0,65	0,663
	0,3	0,428	0,506	0,555	0,59	0,618	0,64	0,658	0,673	0,687	0,698
	0,4	0,474	0,546	0,592	0,624	0,649	0,669	0,686	0,7	0,713	0,723
	0,5	0,512	0,578	0,62	0,651	0,674	0,693	0,708	0,721	0,733	0,743
	0,6	0,542	0,605	0,644	0,672	0,694	0,712	0,726	0,739	0,749	0,758
	0,7	0,569	0,627	0,664	0,691	0,711	0,727	0,741	0,753	0,763	0,772
	0,8	0,592	0,646	0,681	0,706	0,726	0,741	0,754	0,765	0,774	0,783
	0,9	0,612	0,663	0,696	0,72	0,738	0,753	0,765	0,776	0,785	0,793
	1,0	0,629	0,678	0,71	0,732	0,749	0,763	0,775	0,785	0,794	0,801
	1,2	0,66	0,704	0,732	0,753	0,768	0,781	0,792	0,801	0,809	0,816
	1,4	0,685	0,725	0,751	0,769	0,784	0,796	0,806	0,814	0,822	0,828
	1,6	0,707	0,743	0,766	0,784	0,797	0,808	0,817	0,826	0,832	0,838
	1,8	0,725	0,758	0,78	0,796	0,809	0,819	0,827	0,835	0,841	0,847
	2,0	0,741	0,771	0,792	0,807	0,818	0,828	0,836	0,843	0,849	0,854

Fuente: Rodríguez (1985).

La representación gráfica de la tabla anterior se incluye en la ilustración 367. Se observa, como es lógico, que para igual valor del ratio de costes “R” la capacidad económica se incrementa con el número de ataques (algo que se aprecia al moverse en la vertical y donde la curva del sistema con “n+1” ataques siempre está por encima de la “n” ataques) al tiempo que si se mantiene fijo

el número de atraques y la ley de servicio la capacidad económica crece con el ratio A/B (es decir cuanto mayor es el coste fijo portuario en relación al del buque la capacidad económica se produce con mayores tasas de ocupación y a la viceversa cuanto más costoso es el buque proporcionalmente menos esperas relativas puede soportar nuestro sistema).

Ilustración 367. Capacidad Económica con Leyes de llegada Exponencial (Sistemas $M/G(z)/N$).



Fuente: Elaboración propia con datos de Rodríguez (1985).

En el segundo caso (cualquier sistema de llegadas y de servicio con un atraque) este autor utiliza como estadístico para realizar las aproximaciones y dar los resultados el parámetro:

$$R = \frac{\gamma}{\gamma + Z - 1} \cdot \frac{A}{B} \quad (129)$$

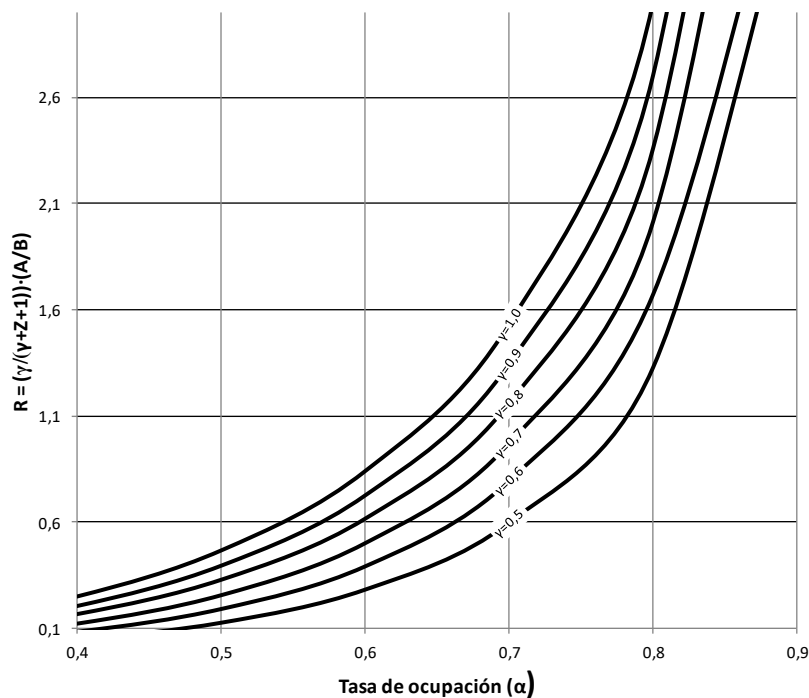
Presentando en este caso una tabla de doble entrada (α, γ) con el que se calcula el factor “R”.

Los resultados extraídos por este autor se pueden ver en la siguiente tabla 64, así como su representación gráfica en la ilustración 368.

Tabla 64. Capacidad Económica sistemas de un ataque (Sistemas $G(\gamma)/G(z)/1$). (1985).

		Capacidad Económica sistemas 1 ataque ($G(\gamma)/G(z)/1$)					
		Ley de Llegadas ($G(\gamma)$)					
		$\gamma=0,5$	$\gamma=0,6$	$\gamma=0,7$	$\gamma=0,8$	$\gamma=0,9$	$\gamma=1,0$
α	0,1	0,000	0,000	0,002	0,004	0,007	0,011
	0,2	0,001	0,007	0,015	0,025	0,036	0,048
	0,3	0,013	0,031	0,051	0,074	0,097	0,122
	0,4	0,048	0,085	0,125	0,166	0,207	0,250
	0,5	0,126	0,192	0,259	0,328	0,397	0,467
	0,6	0,282	0,393	0,504	0,616	0,728	0,841
	0,7	0,599	0,797	0,974	1,161	1,348	1,535
	0,8	1,327	1,673	2,016	2,360	2,704	3,048
	0,9	3,710	4,04	5,376	6,208	7,039	7,871

Fuente: Rodríguez (1985).

Ilustración 368. Capacidad Económica sistemas de un ataque (Sistemas $G(\gamma)/G(z)/1$ 

Fuente: Elaboración propia con datos de Rodríguez (1985).

De la ecuación (129) que define el parámetro “R” se puede observar cual es la influencia de la regularidad en las leyes de servicio. Así, si se mantiene fija la ley de llegadas, cuanto mayor es Z (más aleatoria la ley de servicio) menor es el valor de “R”.

En el límite, cuando el servicio es totalmente aleatorio ($Z=1$), el parámetro R se transforma en:

$$R = \frac{1}{Z} \cdot \frac{A}{B} \quad (130)$$

y cuando la ley de servicio es constante ($Z = 1/2$) el parámetro R se transforma en

$$R = \frac{1/2}{Z-1/2} \cdot \frac{A}{B} = \frac{1}{2Z-1} \cdot \frac{A}{B} \quad (131)$$

7.3. Métodos de Capacidad Económica.

7.3.1. Métodos de capacidad económica de primera generación. Índices de relación en función de costes de buque y muelle.

Al margen de este desarrollo teórico y académico, algunas aplicaciones prácticas de este método para la determinación del número óptimo de atraques han sido publicados en diversas revistas especializadas, destacando por orden cronológico los estudios de Nicolau (1967); Wanhill (1974a), Noritake y Kimura (1983a); Plumlee (1996); Huang (1990); Huang *et al.* (1995); Huang y Wu (2005); Huang *et al.* (2007, 2010 y 2012).

En estos estudios se estima el número óptimo de atraques de un puerto (“N_o”), usando ecuaciones que relacionan el parámetro de densidad de tráfico (“α”) y diferentes índices de evaluación económica (aquí, genéricamente, bajo la notación “IND”), que están usualmente conectados de una u otra manera con el nivel de servicio (“μ”) y/o la frecuencia de llegadas (“λ”) y con funciones de coste (costes de muelle, costes de buque y/o costes de otros elementos).

Como funciones de coste (“C”) e índices de optimización del número de atraques (“IND”) estos autores utilizan las siguientes bases metodológicas:

Nicolau (1967) usa como índice la relación entre el coste unitario de espera de los buques³⁷⁵ dividido por la suma de los costes totales de muelle³⁷⁶ más el coste de espera de los buques ($IND_1 = C_{v,b} / (C_{v,b} + C_p)$) y que conceptualmente lleva a asumir como parámetro de ajuste que la planificación de atraques debe supeditarse a los requerimientos de sus dos actores principales: los operadores portuarios y las compañías navieras / fletadores, poniendo más énfasis en los periodos de inactividad del buque e ignorando los de actividad u operación de los mismos.

³⁷⁵ $C_{v,b}$

³⁷⁶ $C_p = C_{v,p} + C_{f,p}$

$$C_1 = C_{v,b} + C_p = U_b \cdot \lambda \cdot W_q + U_p \cdot N \quad (132)$$

$$IND_1 = U_b \cdot \lambda \cdot W_q / C_1 \quad (133)$$

donde:

- U_b es el coste de un buque por unidad de tiempo (equivalente a B/V_m),
- λ es la frecuencia de llegadas,
- U_p es el coste del muelle por unidad de tiempo (equivalente a $A/Q + U$),
- W_q es el tiempo medio de espera del buque, y
- N es el número de atraques.

El producto $\lambda \cdot W_q$ representa el número medio de buques en espera o longitud de la cola ($L_q = \lambda \cdot W_q$) y por lo tanto la primera parte del sumando ($U_b \cdot \lambda \cdot W_q$) representa el coste de espera del buque (antes referido como $C_{v,b}$) y la segunda parte del sumando ($U_p \cdot N$) el coste unitario total portuario (antes C_p).

Wanhill (1974a) y Noritake y Kimura (1983a y 1990) introducen en su planteamiento matemático el concepto de coste de servicio del buque y, por tanto, añaden a los estudios anteriores no sólo el tiempo de espera de los buques ($C_{v,b}$) y coste total portuario (C_p) sino los de la propia operación del buque ($C_{f,b}$). Esto responde a la idea más general de que el nivel de servicio prestado en un puerto no sólo depende del tiempo que los buques deben esperar sino de lo eficiente que son las operaciones portuarias. El índice usado pasa por la minimización del operador:

$$IND_2 = C_b + C_p \quad (134)$$

que es, conceptualmente, el que se ha visto visto en los estudios de Rodríguez (1985).

Matemáticamente, abordan este nuevo operador de coste añadiendo al parámetro CI la tasa de ocupación de los muelles (α) que, a su vez, puede definirse a través del índice de servicio (μ). Con ello:

$$IND_2 = C_1 + U_b * \alpha \quad (135)$$

$$IND_2 = U_b * \lambda * W_q + U_p * N + U_b * \alpha = U_b * \lambda * (W_q + 1/\mu) + U_p * N \quad (136)$$

$$IND_2 = U_b * (L_q + \lambda / \mu) + U_p * N \quad (137)$$

Donde, conceptualmente, el coste de operación del buque ($C_{f,b}$) es el 3^{er} sumando ($U_b * \alpha$).

Plumlee (1996) introduce como operador la minimización del indicador:

$$IND_3 = C_b + C_{v,p} \quad (138)$$

suma del tiempo del coste de espera y operación del barco (C_b) y de inactividad de los muelles ($C_{v,p}$), siguiendo con los estudios anteriores pero sin tener en cuenta (restando) el coste de operación del muelle ($C_{v,p} = U_p * \alpha$) o, lo que es lo mismo, afectando el coste total del muelle por su factor de utilización (α) y considerando por tanto el coste de operación del muelle como un coste “hundido” o no recuperable. Con ello la expresión queda:

$$IND_3 = U_b * \lambda * W_q + U_p * N * (1 - \alpha) \quad (139)$$

Haciendo un repaso de las tres funciones de coste se pone de manifiesto como se diferencian en el factor $1 \pm \alpha$ y se puede componer la siguiente tabla comparativa (tabla 65):

Tabla 65. Comparación de Funciones de Coste para determinar el número de atraques según diversos autores.

Autor	Nicolau (1967)	Wanhill (1974a), Noritake y Kimura (1983a y 1990) y Rodriguez (1985)	Plumlee (1996)
Función de Coste	$C_1 = U_b * \lambda * W_q + U_p * N$	$C_2 = U_b * \lambda * W_q * (1 + \alpha) + U_p * N$	$C_3 = U_b * \lambda * W_q + U_p * N * (1 - \alpha)$
Indice	$IND_1 = C_{v,b} / (C_{v,b} + C_p)$	$IND_2 = C = C_b + C_p$	$IND_3 = C_b + C_{v,p}$
Coste de Espera Buque	Si considera	Si considera	Si considera
Coste de Operación de Buque	No considera	Si considera	Si considera
Coste de inactividad de muelle	Si Considera	Si considera	Si considera
Coste de operación de muelle	Si Considera	Si considera	No Considera

Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. Métodos de capacidad económica de segunda generación. Índices de relación en función de costes de buque, muelle y otras componentes de la operación portuaria.

Otros autores, hacen evolucionar los modelos de primera generación y añaden otros componentes de coste más allá que los de actividad e inactividad de muelle y buque.

Huang (1990) y Huang *et al.* (1995, 2007, 2010 y 2012) al coste del buque (“ C_b ”) añaden el coste de la propia mercancía embarcada y lo que llaman costes de interés o financieros de su equipamiento (“ C_{me} ”) (como idea del coste que tiene la inmovilización de la mercancía y los propios medios del buque) y a los costes portuarios le añaden también los propios costes de los servicios portuarios (“ C_{sp} ”) con objeto de que en la función de costes y optimización posterior se introduzca una nueva componente en función de la eficiencia en las operaciones.

Con esto la nueva función de coste por ellos definida queda como sigue:

$$C_4 = C_b + C_{me} + C_{sp} \quad (140)$$

donde,

C_{cg} es el coste de la mercancía y el interés del equipamiento del buque y

$$C_{sp} = C_{ip} + C_{mu} + C_{eq} + C_{pp} + C_{ad} \quad (141)$$

donde:

C_{ip} = costes de construcción y operación de instalaciones portuarias en general,

C_{mu} = costes de construcción y operación de los atraques / muelles.,

C_{eq} = costes de adquisición y mantenimiento de equipamiento portuario,

C_{pp} = costes del personal portuario, y

C_{ad} = costes asociados a las áreas de depósito;

y utilizan como índice del número óptimo de atraques la expresión:

$$IND_4 = C_4 / (U_p * \lambda * V_m) = \frac{U_{ip} + U_{mu} + U_{eq} \cdot G}{U_b + U_{me}} = \frac{R_{ip} + R_{mu} + R_{eq} \cdot G}{1 + R_{cg}} \quad (142)$$

siendo C_4 , U_p (coste unitario portuario), U_b (coste unitario del buque) y λ los parámetros que ya se han definido y:

U_{ip} = Coste Unitario de instalaciones portuarias generales,

U_{mu} = Coste Unitario de muelles / atraques,

U_{eq} = Coste Unitario de equipamiento portuario (grúas),

U_{me} = Coste Unitario de mercancía embarcada y el equipamiento del barco, y

G = Número de grúas;

y los ratios “R”, los correspondientes ratios de coste al coste del barco, es decir

$R_{ip} = U_{ip} / U_b$,

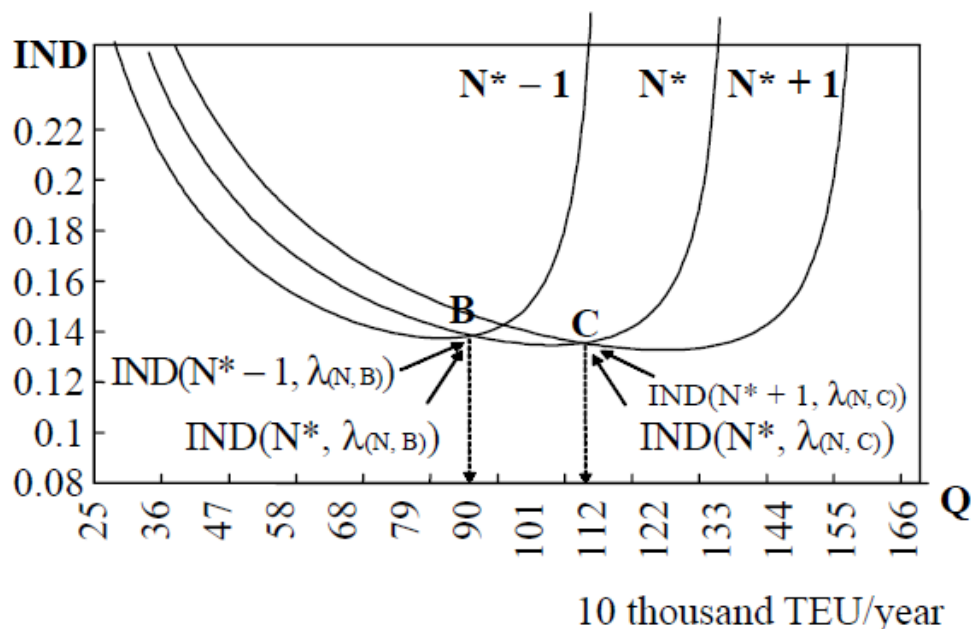
$R_{mu} = U_{mu} / U_b$,

$R_{eq} = U_{eq} / U_b$,

$R_{me} = U_{me} / U_b$

Este índice IND_4 pone en relación todas las componentes de coste (buque, puerto, mercancía y servicios portuarios) con el coste total del buque (en espera y operación) y cuya representación gráfica en un ejemplo práctico proporcionada por estos autores se incluye en la Ilustración 349.

Ilustración 369. Cálculo de la Capacidad Optima de los muelles utilizando el índice de

Fuente: Huang *et al.* (1995).

Mediante este ejercicio práctico se puede corroborar las conclusiones que de manera teórica se habían introducido con anterioridad y que se representaba de manera conceptual en la ilustración 365.

Huang y Wu (2005) basados en estudios anteriores de Newell (1982), Huang (1990) y Huang *et al.* (1995) van más allá y estiman el número inicial de atraques de un puerto (“ N_0 ”), usando ecuaciones que relacionan la densidad de tráfico (“ α ”) con el que denominan parámetro inicial de infraestructuras del sistema (“ β ”), que cambia según la evaluación de diferentes índices pero que está también conectado con el nivel de servicio (“ μ ”) y los tiempos medios de espera del buque (“ W_q ”) y con funciones de optimización que adquieren la siguiente expresión matemática:

$$N_0 = \alpha + \beta * \alpha^{1/2} \quad (143)^{377}$$

$$\beta = a + b \cdot e^{-c \cdot \alpha^d} \quad (144)$$

Sin entrar en la detallada formulación matemática de estos autores que pueden ser consultada en las reseñas bibliográficas ofrecidas en la bibliografía, si resulta de interés dar sus resultados para

³⁷⁷ Newell (1982) plantea que el parámetro de infraestructuras del sistema (“ β ”) debe estar comprendido entre los valores (1-2) en el caso de sistemas con muchos servidores en el que es válida la utilización de una aproximación a distribución normal para estimar el número de usuarios. Estudios desarrollados en el campo de las telecomunicaciones y por tanto sólo parcialmente aplicables al caso portuario.

los tres niveles de servicio que definen y para el índice de evaluación de coste que utilizan que es el mismo que los estudios anteriores, es decir:

$$IND_4 = C_4 / (U_p * \lambda * V_m) = \frac{U_{ip} + U_{mu} + U_{eq} \cdot G}{U_b + U_{me}} = \frac{R_{ip} + R_{mu} + R_{eq} \cdot G}{1 + R_{cg}} \quad (145)$$

En la tabla 66 se recopilan los resultados dando los rangos de aplicación para diversos parámetros operativos y el índice de evaluación de coste que ellos utilizan.

Tabla 66. Parámetros de cálculo (índice de evaluación del coste y parámetros de infraestructura) para distintos niveles de servicio.

	Nivel de Servicio A μ_A	Nivel de Servicio B μ_B	Nivel de Servicio C μ_C
Probabilidad de Espera Grado de Congestión o ratio de espera	0-20%	20%-50%	50%-70%
W_q Tiempo medio de espera	0-3 horas	3-6 horas	6-12 horas
$W_q * \mu$ Factor de tiempo de espera	0-0.15	0.15-0.3	0.3-0.5
IND_5 Índice de evaluación del Coste	0-0.5	0.5-1.0	1.0-5.0
β (Parámetro de infraestructuras)	$1.1 + 2.8 \cdot e^{-2.5 \cdot \alpha^{0.5}}$	$0.65 + 2.3 \cdot e^{-2.0 \cdot \alpha^{0.5}}$	$1.0 + 2.3 \cdot e^{-1.8 \cdot \alpha^{0.5}}$

Fuente: Huang y Wu (2005).

El número inicial de atraques dependerá en cada una de las formulaciones que se han revisado del valor que se adopte para los índices de los que dependen, siendo ilustrativa como ejemplo numérico la tabla 67. En la misma se observa que el número de atraques en las formulaciones antiguas eran independientes de los niveles de servicio (pues para estos métodos no era un parámetro de cálculo), algo que obviamente va en contra de la intuición (si se quiere prestar un mejor servicio, es decir, que los barcos esperen menos, el número de atraques iniciales debe ser obviamente mayor).

Tabla 67. Comparación de métodos de estimación del número inicial de ataques según tres métodos³⁷⁸.

Índice	Valor del Índice	N* Número Óptimo de ataques	N ₀ Huang y Wu (2005)	N ₀ Nicolau (1967), Noritake y Kimura (1983a) y Plume (1996)	N ₀ Newell (1982)	
					$\beta = 1$	$\beta = 2$
Probabilidad Espera de Grado de Congestión o ratio de espera	10%	10	9	7	9	12
	15%	9	9			
	30%	8	8			
W _q Tiempo medio de espera	0.5 horas	10	9			
	4.0 horas	9	9			
	5.0 horas	8	8			
W _q * μ Factor de tiempo de espera	0.03	10	9			
	0.1	9	9			
	0.2	8	8			

IND ₄ Índice de Coste	N* Número Óptimo de ataques	N ₀ Huang y Wu (2005)	N ₀ Plume (1996) y Noritake y Kimura (1983a)	N ₀ Newell (1982)	
				$\beta = 1$	$\beta = 2$
0.25	10	9	7	9	12
0.50	9	9			
1.00	8	8			
2.50	8	7			
5.00	7	7			

Fuente: Huang y Wu (2005).

³⁷⁸ Niveles de servicio ($\alpha = \lambda / \mu = 6.16$) para un operatividad de 365 días/año, tráfico de 1.8 millones de toneladas y ratios de eficiencia de 800 Toneladas / día.

8. Otros modelos basados en QT aplicados en aplicaciones portuarias.

Al margen de las aplicaciones y metodologías anteriores, todas ellas realmente extendidas, a lo largo del último siglo³⁷⁹ han surgido muchas variantes de los sistemas QT que pasan desde ir eliminando restricciones al modelo, estudiar las fases no estacionarios³⁸⁰, hasta estudiar el comportamiento de sistemas que trabajan como verdaderas redes de cola³⁸¹, o sistemas con colas en el que los clientes llegan en grupo³⁸², etc...

Muchas de ellas han sido incorporadas al campo portuario. Efectivamente, como en casi todos los campos de la OR la aparición del computador y la rápida evolución que han experimentado tanto hardware como software (que han derivado en una mayor accesibilidad para muchos investigadores de herramientas específicas, una notable reducción de su coste de implementación y una increíble reducción de tiempos de análisis) han propiciado el desarrollo de modelos más complejos.

Dragović y Zrnić (2011) presentan una interesante recopilación bibliográfica y esquematización de cómo los modelos de planificación de sistemas portuarios han ido evolucionando desde las primeras aplicaciones prácticas basadas directamente en la aplicación analítica de soluciones de QT con las simplificaciones que ya se han puesto de manifiesto (años 60) hasta su relativamente reciente acoplamiento con modelos de simulación y/o con el enriquecimiento mediante modelos de colas más complejos donde se prescinde de alguna de las simplificaciones que se admitían en un principio (véase tabla 68 para ver la evolución de dichos sistemas y la tabla 69 para ver las referencias bibliográficas).

³⁷⁹ Como se puso de manifiesto la QT fue formulada originalmente por Agner Kraup Erlang a principios del siglo XX y desarrollada a lo largo de más de 21 años de investigaciones (1908-1929).

³⁸⁰ Periodo de tiempo inicial hasta que da tiempo suficiente para que entren clientes en el sistema y se forman las colas.

³⁸¹ Aplicaciones en las que se forman colas cíclicas en el que cliente de una manera oscilatoria va acudiendo a determinados servidores.

³⁸² Típica por ejemplo del sector del transporte cuando los pasajeros de un medio colectivo llegan a un punto de destino o, por citar ejemplo portuario, el caso de un convoy de buques atravesando un canal y llegando a un determinado puerto en su cercanía.

Tabla 68. Evolución de modelos de planificación de Sistemas Portuarios.

Aproximaciones matemáticas a planificación de Sistemas Portuarios basados en QT y modelización (desde la formulación clásica de QT a modelos de simulación)					
Formulación basada en la QT (Queuing formulae o QM's)	Formulaciones analíticas y comparación con modelos de simulación	Simulación / optimización con modelos de redes (<i>Queuing network models</i> o QNM's)	Modelos de Colas Cíclicos & Procesos de Decisión Markovianos	Formulaciones analíticas y soluciones numéricas de colas con leyes de llegadas en grupos ("bulk arrival queues")	Estudios de soluciones estables frente a soluciones dependientes del tiempo

Fuente: Dragović y Zrnić (2011).

Tabla 69. Distintas aproximaciones basadas en QT en ambiente portuario.

Tipología de Estudios	Autor
Aspectos Generales: i) estudio de sistemas con un único servidor (ataque) <i>versus</i> sistemas de varios servidores (multi-ataque); 2) formulaciones y aproximaciones analíticas para distintos sistemas; 3) utilización de distribuciones no exponenciales para el tiempo de servicio y tiempo de llegadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Fratar et al. (1961). • Nicolaou (1967). • Mettam (1967). • Jones y Blunden (1968). • Nicolaou (1969). • Plumlee (1969). • Miller (1971). • Weille, J. de y Ray (1974). • Wanhill (1974a). • Wanhill (1974b). • Drew <i>et al.</i> (1975). • Edmond y Maggs (1976). • Griffiths (1976). • Edmond <i>et al.</i> (1978). • Noritakey Kimura (1983b). • Noritake(1985). • Schonfeld y Sharafeldien(1985).

Tipología de Estudios	Autor
	<ul style="list-style-type: none"> • Sabriay Daganzo(1989). • Noritake y Kimura (1990). • Daganzo (1990b). • Gransberg y Basilloto (1998). • Taniguchi <i>et al.</i> (1999). • Shabayek y Yeung (2000). • Chuy Huang(2002). • Kiani <i>et al.</i> (2006). • Kuo <i>et al.</i> (2006). • Guan y Liu (2009). • El-Naggar (2010).
Simulación mediante modelos de colas	<ul style="list-style-type: none"> • Mavrakis y Kontinakis (2008).
Modelos Cíclicos de Colas y Procesos de decisión Markoviano (Teoría de Markov).	<ul style="list-style-type: none"> • Koenigsberg y Lam (1976). • Kang <i>et al.</i> (2008). • Mennis <i>et al.</i> (2008).
Formulaciones y aproximaciones analíticas comparadas con modelos de simulación (fundamentalmente en terminales de contenedores).	<ul style="list-style-type: none"> • Easa (1987). • Kozan (1994). • Kozan (1997b). • Yamada <i>et al.</i> (2003). • Dragović <i>et al.</i> (2006a). • Dragović <i>et al.</i> (2006b). • Huang <i>et al.</i> (2007). • Goodchild y Mohan (2008). • Dragović <i>et al.</i> (2010). • Huang <i>et al.</i> (2010).
Integración de simulación y optimización con modelos de redes de cola. Modelos de colas con ecuaciones en tiempo discreto.	<ul style="list-style-type: none"> • Sacone y Siri (2009). • Legato <i>et al.</i> (2009).
Formulaciones analíticas y numéricas con llegadas en bloque basadas en QT. Comparación con modelos de simulación.	<ul style="list-style-type: none"> • Kozan (1997a). • Radmilović (1992). • Radmilović <i>et al.</i> (1996).

Tipología de Estudios	Autor
	<ul style="list-style-type: none"> • Radmilovi <i>et al.</i> (2003). • Radmilović <i>et al.</i> (2005). • Radmilović <i>et al.</i> (2005b)
Estado estacionario versus dependiente del tiempo. Modelos de colas (con uno y varios servidores) con limitaciones en las áreas de espera	<ul style="list-style-type: none"> • Novaes y Frankel (1966). • Berg-Andreassen y Prokopowicz (1992). • Zrnić <i>et al.</i> (1999). • Lagoudis y Platis (2009). • Laih y Sun (2010).
Modelos de redes de cola abiertos y cerrados versus simulación DES.	<ul style="list-style-type: none"> • Canonaco <i>et al.</i> (2008). • Munisamy (2010).

Fuente: Dragović y Zrnić (2011).

Efectivamente, como se ha puesto de manifiesto, la resolución clásica de los problemas de QT extendida en planificación portuaria pasa por la asunción de una serie de hipótesis simplificadoras y la adopción de unos modelos simples.

Otros autores han aplicado a puertos y terminales modelos más complejos dentro de las posibilidades que facilita la QT. Como aportaciones más relevantes a planificación portuaria dentro de estos modelos complejos se pueden citar:

- Los modelos redes (o QNM del inglés “*Queueing Network Models*”);
- Los procesos de decisión markovianos.
- Los sistemas con leyes de llegadas en grupo (en inglés conocidos como “*Bulk Arrival Queues*” o “*Batch Arrival Queues*”),
- Los modelos basados en procesos cíclicos, o
- Los estudios de soluciones numéricas de QT en situación no estacionaria.

No está dentro del objetivo de este anejo entrar en los detalles de estos sistemas complejos que pueden consultarse en caso de ser de interés en las referencias bibliográficas de la tabla 69; ya que las mismas están a la fecha circunscritas a casos muy concretos y quedan a nuestro entender en un ámbito excesivamente académico que dificultan su extrapolación con carácter general.

No obstante lo anterior, se hará a continuación un pequeño resumen de los mismos con el objetivo de proporcionar una idea preliminar de su alcance y aplicabilidad a problemas concretos que pudieran tener que resolverse en un futuro por posibles investigadores.

8.1. Modelos de redes de colas (Queuing Network Models o QNM's).

Los modelos QNM son sistemas en las que existen varias colas y las mismas están conectadas por una rutina de tal manera que los clientes pueden abandonar una cola y pasar a otra bajo ciertas decisiones, condiciones o circunstancias (por ejemplo han recibido el servicio en una primera cola y pasan a otra).

Estos sistemas están especialmente indicados para modelizar sistemas en los que participan diferentes elementos con un carácter cíclico y en los que conviene conocer los cuellos de botella del sistema y como unos elementos de la cadena afectan en el rendimiento de los otros.

Como antecedentes científicos de estos modelos fuera del ámbito portuario se pueden citar los estudios de Jackson (1963), Gordon y Newell (1967) y Baskett *et al.* (1975).

Las redes, que suelen ser representadas por notación $Q(K)$, son sistemas que tienen “K” usuarios y un número “L” de estaciones servicio con “ M_i ” servidores en cada estación ($i=1,\dots,L$).

En los casos que se analizan, $Q(K)$ contiene un número fijo de clientes que proceden a las estaciones de servicio de acuerdo con una cadena markoviana. En las estaciones se asume una disciplina de servicio FIFO siendo los usuarios atendidos en orden de llegada y estando los tiempos de servicio exponencialmente distribuidos.

Bajo estas hipótesis y en ambientes portuarios las cadenas cerradas de colas se antojan muy robustas ya que como demostraron Van Hee y Wijbrands (1988) si el tiempo de servicio no ajusta a una distribución exponencial los resultados con respecto al rendimiento no difieren mucho con respecto al caso en que sí ajustan a dicha distribución.

El primer ejemplo que se ha registrado en la utilización de teoría de redes en puertos se refiere, sin embargo, a las investigaciones de Easa (1987), quien apoyándose en la teoría de colas investigaba sobre el servicio de remolque en puertos congestionados. Este autor construyó un modelo con “m” remolcadores (servidores) que daban servicio a “n” atraques (usuarios o clientes) y asignaba distribuciones de probabilidad tanto al tiempo de servicio del remolcador como de barco en muelle. Estableció dos casos uno en el que “m” era un número elevado y otro en el que “m” presentaba restricciones. En el primero de los casos (sin restricciones en remolcadores) la distribución de probabilidad se asemejaba a una función binomial y daba resultados muy ajustados conforme los datos reales con los que se contrastó. Para el caso de restricciones en el número de

remolcadores (pequeños “m”) el autor desarrolló su propia distribución mediante un modelo de simulación de varios casos. Para este caso llegó a la conclusión que el modelo arrojaba datos razonablemente aproximados a los reales con los que validó siempre que el rango de indisponibilidad de remolcadores fuera inferior al 10%.

Muy ilustrativos son también en este campo tanto el planteamiento teórico como las conclusiones prácticas presentadas por Munisamy (2010) ejemplo que se describirá a continuación con cierto grado de detalle y que servirá para explicar con un ejemplo práctico como funcionan estas redes.

Munisamy (2010) aplica un modelo de cadenas cerradas de colas para el caso concreto de terminales convencionales de exportación de madera, evaluando la eficiencia de la terminal en relación al sistema de manipulación y llegando a conclusiones sobre el rendimiento y capacidad de la terminal.

Su modelo considera la interacción existente entre los elementos de manipulación de la terminal (*forklifts*, tractores, *trailers* y grúas) e investiga los puntos de congestión y cuellos de botella de cada elemento y como éstos afectan al resto.

Las cadenas se formulan en tanto que existen unas colas para los barcos y otras para los *trailers* que han de llevar la mercancía del almacén a la grúa; quienes actúan por tanto como clientes del sistema.

A su vez los *trailers* y tractores actúan como un elemento cíclico en el que van transportando la madera del almacén a la grúa, estando conectados con los *forklifts* (quienes cargan la madera en los *trailers* que son empujados por los tractores) y con las grúas (quienes retiran la madera quedando el tráiler vacío y volviendo a almacén para ser cargado siendo en el proceso empujado por un tractor libre).

En su modelo, un tractor puede abandonar el tráiler en muelle mientras la grúa procede a su descarga y carga del barco.

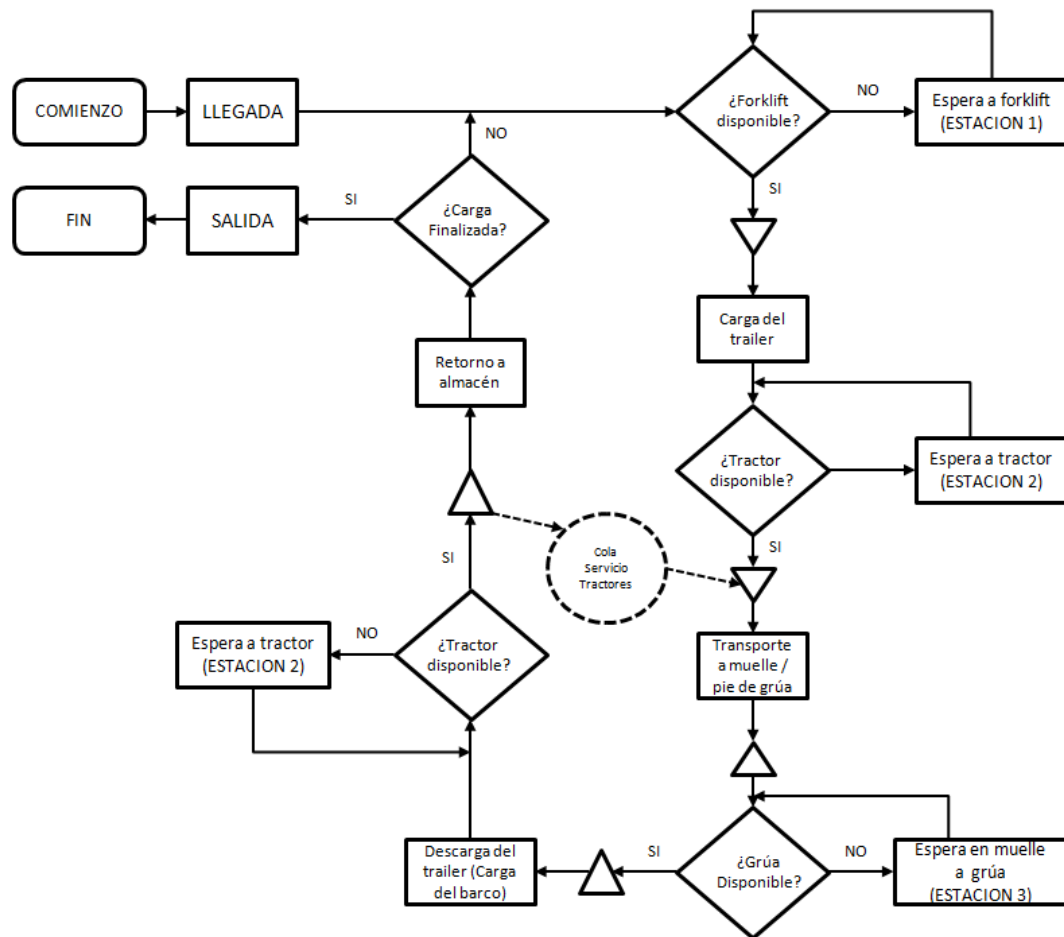
Dicho de otro modo para aplicar los métodos de cadenas cerradas a esta terminal se considera que cada estación de servicio en la red es representada por un conjunto de *forklifts*, tractores y grúas, mientras que los usuarios son los *trailers* que llevan físicamente la madera de almacén a pie de grúa.

Si los usuarios (*trailers*) llegan a una estación (*forklift* en un extremo o grúa en otro) y la encuentran ocupada permanecen en espera hasta que uno está libre (formando una única cola a la espera de que cualquier servidor quede libre).

De igual modo permanecen a la espera en el muelle en el caso de que hubiesen sido vaciados por la grúa pero no existiese tractor que pudiera desplazar el tráiler de nuevo al almacén.

Con todo ello la cadena y diagrama del proceso seguido por el usuario (*tráiler*) en sus tres estaciones (*forklift*, tractor y grúa) se muestra en la ilustración 370, donde se observa la descomposición en elementos simples de la cadena y el carácter cíclico de la misma

Ilustración 370. Diagrama de proceso o modelo de red QNM de una terminal de exportación de Madera.



Fuente: Elaboración propia.

El indicador global de rendimiento de tiempo de servicio es el tiempo transcurrido por el tráiler desde la carga en el *forklift* hasta la descarga en la grúa y vuelta hasta la próxima carga (contando tiempos muertos).

Siempre que el rendimiento de llegada de la madera a la grúa sea menor que el rendimiento de la grúa (por insuficiencia de *trailers*, tractores o *forklifts*) la operación se considera subóptima (ya que tanto grúa como barco deberían esperar siendo éstos los elementos más costosos).

Los resultados finales del modelo se evalúan para distintos escenarios en estadísticas de rendimiento de equipamiento de manipulación y grúas (factores de utilización de *forklifts*, grúa, *trailers* y tractores); tiempo de permanencia medio del tráiler en *forklift*, tractor o grúa; número

de *trailers* en espera; número medio de *trailers* que abandonan la grúa; rendimiento de las grúas (Tn/hora) y tiempo total de carga (horas).

Con ello el modelo proporciona una previsión de la capacidad de la terminal.

Este modelo se aplica como caso de estudio para la terminal de exportación de madera del Puerto de Klang (principal puerto de Malasia con alto grado de ocupación y dimensiones mínimas adecuadas para su uso como ejemplo y calibración del modelo en estado actual).

La terminal consta en esencia de un único puesto de atraque de 213 m. y en ella recalcan usualmente barcos especializados de entre 6.000 y 30.000 Toneladas.

El autor proporciona unas guías de gestión para la operación de dicha terminal (número óptimo de cada elemento en función del tráfico) formulando la eficiencia operacional y las estrategias de expansión de la misma (decisiones de inversión en cada uno de los medios que componen el sistema).

Lo primero que hicieron estos autores es someter a un test χ^2 las distribuciones de tiempo de servicio con los datos reales de servicio de grúas, tractores y *forklifts*. De este test infirieron con un nivel de confianza del 95% que las distribuciones ajustaban a una exponencial negativa.

Los resultados que proporciona se encuentran compilados y ordenados en la tabla 70 y que se muestra a continuación más por el hecho de poner de manifiesto el tipo de resultados que se pueden extraer de estos modelos que por el interés general de los mismos.

Tabla 70. Productividad terminal de madera Puerto de Klang (Malasia). Simulación mediante QNM.

		SIMULACIÓN 1		SIMULACIÓN 2		SIMULACIÓN 3		SIMULACIÓN 4	
		Nº	UTILIZACIÓN	Nº	UTILIZACIÓN	Nº	UTILIZACIÓN	Nº	UTILIZACIÓN
FORKLIFTS		2	16%	2	25%	3	17%	3	20%
TRACTORES		1	15%	1	24%	1	24%	2	15%
GRÚAS		1	95%	2	76%	2	76%	2	91%
TRAILERS		3	53%	3	84%	3	84%	4	76%
TIEMPO MEDIO ESTANCIA TRAILER	EN FORKLIFT	0.148 horas		0.148 horas		0.145 horas		0.146 horas	
	EN TRACTOR	0.092 horas		0.100 horas		0.100 horas		0.081 horas	
	EN GRUA	1.028 horas		0.507 horas		0.507 horas		0.639 horas	
NUMERO MEDIO TRAILERS EN ESPERA	EN FORKLIFT	0.324		0.517		0.509		0.618	
	EN TRACTOR	0.406		0.701		0.804		0.684	
	EN GRUA	2.270		1.780		1.790		2.700	
NUMERO TRAILERS ABANDONAN GRÚA		2.208		3.509		3.521		4.227	
RENDIMIENTO		22.08 Ton/hora		35.09 Ton/hora		35.21 Ton/hora		42.27 Ton/hora	
TIEMPO CARGA		45.29 horas		28.50 horas		35.09 horas		23.66 horas	

Fuente: Munisamy (2010).

Como se aprecia, se simularon 4 escenarios diferentes correspondiendo cada uno de ellos con posibles fases de expansión comenzando con el estado inicial compuesto por una cadena de 2 *forklifts*, 3 *trailers*, 1 tractor y 1 grúa.

En este escenario inicial se conseguían rendimientos medios de 22.08 Tn/hora y tiempos medios de carga de 45.29 horas (para cargamentos de 1000 toneladas de madera) presentando cada uno de los elementos las tasas de ocupación que se citan a continuación: grúas (95%), *trailers* (53%), tractores (16%) y *forklifts* (15%); y llegando por tanto a la conclusión de que este sistema estaba cercano a la saturación por insuficiencia de grúas y que pequeños incrementos del tráfico llevarían al colapso del sistema y al incremento exponencial de esperas de buques si no se realizaban actuaciones de incremento de capacidad del sistema mediante la inversión en grúas.

En un nuevo escenario (escenario 2), y en línea de la conclusión anterior añaden al sistema una grúa quedando el sistema con 2 *forklifts*, 3 *trailers*, 1 tractor y 2 grúas; obteniéndose unas notables mejoras de los rendimientos (pasando de 22 Tn/hora a 35 Ton/hora y descensos del tiempo de carga medio de 45.3 horas a 28.5 horas).

Obviamente el factor de utilización de la grúa desciende hasta un 76% pero se incrementa el de los *trailers* que sube hasta un 84% comenzando a ser éste el cuello de botella ya que los otros dos elementos de la cadena prácticamente no modifican su utilización que se mantienen en un 25% (*forklifts*) y 24% (tractores) sólo ligeramente superiores a los del escenario 1. Siendo así parece razonable pensar que el próximo escalón de inversión debería ser precisamente la adquisición de un nuevo tráiler.

En un nuevo escenario se complementa esta adquisición junto con la de un *forklift* y un tractor adicional con el objetivo de maximizar su utilización (escenario 4) consiguiendo con ello una práctica duplicación de rendimientos sobre el escenario inicial (42 Tonelada/hora) y generándose de nuevo el cuello de botella en la grúa (utilización al 91%).

Los autores presentan un escenario adicional (escenario 3) correspondiente al escenario 2 + un *forklift* para poner de manifiesto la escasa influencia de esta decisión en los parámetros de rendimiento de la terminal.

Estos sistemas son también analizados por Canonaco *et al.* (2008) quienes utilizan los QNM's en el caso concreto de terminales de contenedores. Estos autores ponen de relieve como introducción la necesidad de maximizar la productividad de un recurso caro como son las grúas de los muelles y, al mismo tiempo, minimizar los tiempos de espera de los buques; conceptos que como se ha puesto de manifiesto juegan en sentido contrario (altas tasas de utilización de grúas que maximicen su utilización implican altas tasas de ocupación de muelle y con ello unas mayores esperas relativas de los buques).

Para resolver este problema y buscar los óptimos usaron en sus investigaciones modelos de redes de colas, que resolvían, dada su complejidad, mediante la técnica computacional DES. Mediante esta modelización y la introducción como eventos del modelo las diferentes decisiones o políticas de asignación de medios y programación de actividades (asignación de grúas a buques en cada puesto de atraque, asignación de *stradle carriers* a cada grúa, etc...) medían los resultados

obtenidos (umbrales de capacidad obtenidos con cada decisión y tiempos que se tarda en completar las operaciones en cada caso) y con ello tenían una herramienta para determinar la bondad de cada uno de las decisiones y las bases para tomar las decisiones oportunas en cuanto a la asignación de medios y la programación que ya ha sido mencionado.

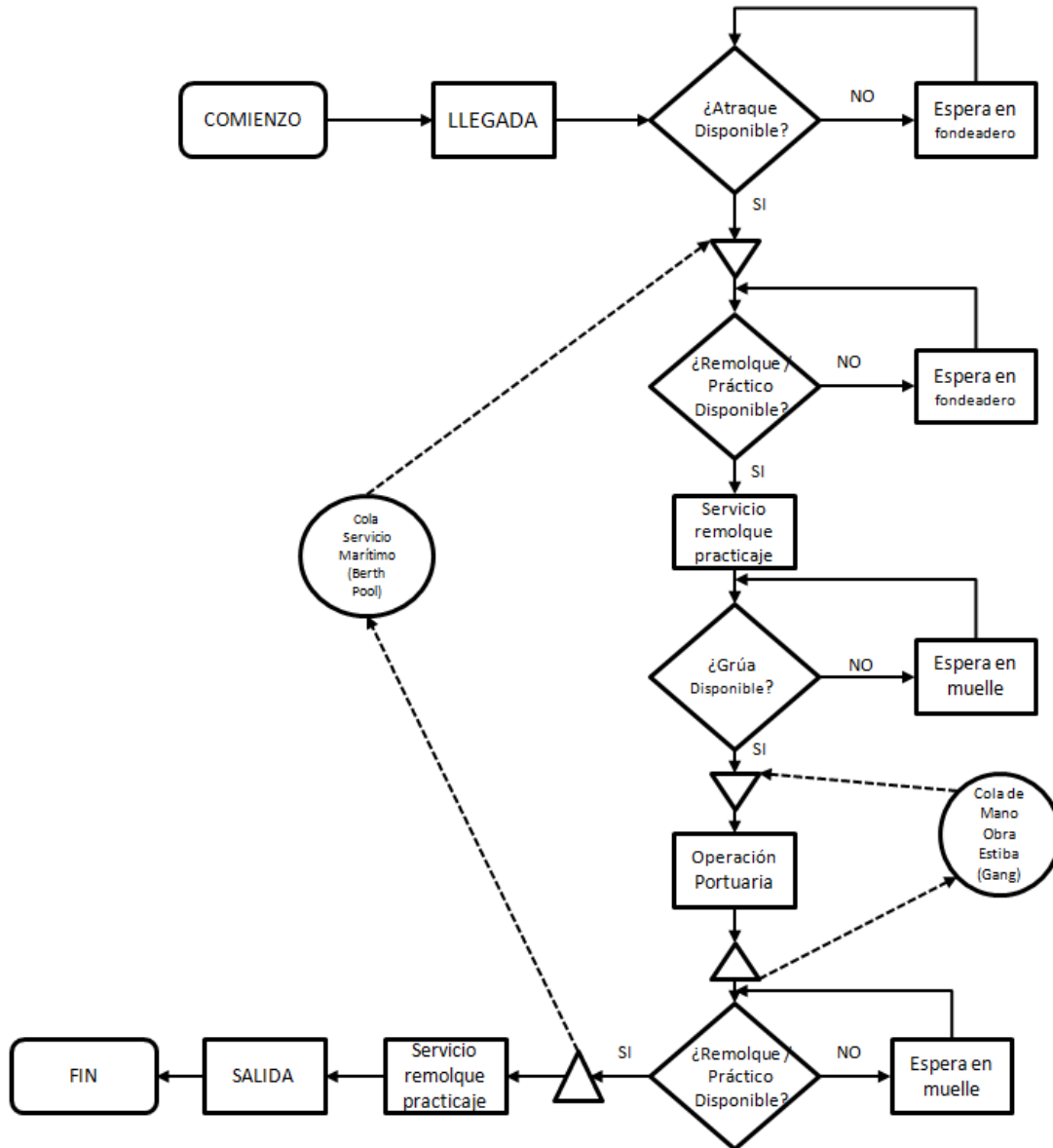
El proceso de modelización de las cadenas es similar al que se ha explicado con anterioridad donde las estaciones de servicio son las grúas atendiendo al buque y los usuarios los *straddle carriers* que alimentan las grúas.

Los resultados de simulación son contrastados por estos autores con datos reales llegando a conclusiones interesantes en relación al óptimo de asignación de *straddle carriers* por grúas.

Estos estudios tienen unos antecedentes en los de Legato y Mazza (2001) quienes también habían utilizado modelos de redes QNM's bajo simulaciones DES y las habían aplicado al caso concreto de la terminal de contenedores del puerto de Gioia Tauro (Italia). En este caso definen un modelo en el que el usuario es el propio barco y como estaciones de servicio los muelles (disponibles o no disponibles), las grúas (disponibles o no disponibles) y los propios remolcadores y prácticos (disponibles / no disponibles). Así a la llegada de un barco a puerto si no existe muelle o remolcador libre procede a fondear hasta que ambos elementos están disponibles. Una vez atracado la operación no comienza hasta que haya una grúa libre (y mano para realizar la operación) y no se libera el atraque hasta que haya terminado la operación y vuelva a existir remolcador y práctico libre.

Siendo así los autores descomponen el complejo proceso en tareas simples siguiendo el siguiente flujo en la cadena, donde a la tradicional cola de espera de buque esperando atraque habría que añadir los procesos de cola a la espera de poder recibir el servicio marítimo – portuario (tanto a entrada como a salida), la espera en muelle a la espera de tener grúa y la afectación a la operación portuaria por la disponibilidad de mano portuaria (estiba). Todo ello se sintetiza en la ilustración 371, siendo este modelo de red extrapolable a prácticamente cualquier tipo de mercancía.

Ilustración 371. Modelo Red. Sistema QNM en una terminal marítima. Modelización propuesta por Legato y Mazza (2001) para la terminal de contenedores del puerto de Gioia Tauro (Italia).



Fuente: Elaboración propia.

Legato *et al.* (2009) siguiendo con sus estudios en el caso de terminales de contenedores han presentado aplicaciones prácticas similares en lo que se refiere a la toma de decisiones de asignación de grúas en una terminal de contenedores sometida a una ley de llegadas de buques y tiempos de servicio de dichas embarcaciones.

En este caso buscan y analizan escenarios de asignación de grúas por lotes a diferentes bloques dentro de la terminal y con ello se determina cual es la mejor política de asignación posible y se dan pautas y políticas de operación en la propia terminal (es decir ponen en relación la cadena de grúa y medios de manipulación con el patio de almacenamiento).

En sus estudios, estos autores utilizan técnicas estadísticas conocidas como R&S (del inglés “*ranking and selection*”³⁸³) demostrando la robustez de estas rutinas para aplicación práctica en casos concretos.

8.2. Procesos de decisión markovianos

Mennis *et al.* (2008) y Kang *et al.* (2008) aplicaron los procesos de decisión markovianos al ámbito portuario.

Los primeros en un interesante estudio de estimación del riesgo de retrasos (y sus consecuencias económicas para la terminal y el barco) en el caso de ruptura de la maquinaria de manipulación de una terminal de contenedores.

Mediante éste metodología los procesos de decisión markovianos no sólo se han demostrado útiles para evaluar el impacto económico de dichos eventos (ruptura de maquinaria) sino para poner el foco en los problemas o cuellos de botella reales de la terminal y ayudar a solventarlos en línea de los estudios comentados con anterioridad.

Los segundos centran su investigación en los elementos de manipulación terrestres necesarios en la operación de una terminal de contenedores; presentando un ejemplo práctico para el puerto de Balboa (Panamá). En su modelo consideran tanto las grúas como los remolques necesarios para acarrear el contenedor al o desde el patio en la zona de depósito.

Éstos utilizan funciones de distribución exponenciales para el tiempo de servicio de grúas y utilizan los procesos markovianos para inferir resultados para otras distribuciones de servicio tanto para grúas como de tiempo de transporte de remolques dentro de la terminal.

³⁸³ Las técnicas “*ranking and selection*” son un grupo de técnicas estadísticas usadas para justificar la selección de la mejor solución (o conjunto de mejores soluciones) dentro de un universo finito de soluciones. Estas técnicas se basan en la estimación del rendimiento de las soluciones y la “mejor” de las soluciones es aquella con el máximo o mínimo valor esperado considerando un criterio de rendimiento dado (Goldsman y Nelson, 1994). Estos procedimientos son descritos con detalle en la tesis doctoral de Kiekhäfer (2011).

8.3. Modelos cíclicos en QT

Los modelos cíclicos en QT fueron abordados de manera académica por Cooper y Murray (1969) en su “*Queues Served in Cyclic Order*” y fueron exportados a caso portuario por Koenigsberg y Lam (1976) quienes trabajaron sobre tráficos de GNL y sobre la base de que estos sistemas se componen por un número limitado de barcos operando en un único (o muy limitado) número de terminales de carga (licuefacción) y un único (o muy limitado) número terminales de descarga (regasificación). Dan soluciones sobre el número de barcos esperados en cada estado, el tiempo medio de espera en puerto, etc....

Se trata de estudios basados en operaciones de flota más que en planificación portuaria y presentan un interesante trabajo comparado de sistemas teóricos de QT (asumiendo llegadas aleatorias y servicios exponenciales) y otras distribuciones generadas mediante simulación.

Introducen además un efecto adicional que es el estadístico que define el tiempo de viaje entre ambas terminales.

Un estudio similar fue adoptado por Daskin y Walton (1983) cuando estudiaron la cadena logística asociada al transporte de crudo. Estos autores establecieron un modelo para analizar las operaciones *hub-feeder* por el que los grandes superpetroleros hacen escala en un número limitado de puertos (a los que pueden acceder por condiciones de calado) y desde éstos se produce un fraccionamiento de la carga que se carga en barcos de menores dimensiones que los transportan al resto de puertos con menores calados operativos.

En el capítulo 4 se trata este tipo de problemas específicos, clásico del tráfico de graneles, denominado “*lightering*” en literatura anglosajona.

Estos autores asumían que las llegadas de superpetroleros, los tiempos de servicio de éstos en puerto, y el tiempo de carga de los barcos *feeders* seguían leyes exponenciales y modelizaban por tanto la actividad de carga de estos barcos *feeders* mediante un modelo de colas cíclico donde las demoras de los superpetroleros se aproximaban además a diferentes modelos $M/E_k/N$.

Había por tanto dos modelos de colas acoplados (es por tanto también un QNM) conectados mediante el tiempo de servicio del propio petrolero.

Tal como se ha puesto de manifiesto con anterioridad, otros autores, al diseñar las cadenas, describen procesos igualmente cíclicos en cuanto al comportamiento de los usuarios de las estaciones (ciclo del tráiler descrito por Munisamy (2010) en el caso de una terminal de madera o ciclo del *stradle carrier* en una terminal de contenedores descrito por Canonaco *et al.* (2008).

8.4. Sistemas con llegadas de buques / mercancía en grupos. Sistemas $M(n)/M/N$ y $M(n)/G/N$

Los sistemas portuarios con leyes de llegadas en grupo ("*Bulk Arrival Queues*" o "*Batch Arrival Queues*"), han sido foco de atención de las disertaciones y estudios de Z. Radmilović quien presenta diversas referencias bibliográficas para este caso especial (Radmilović, 1992; y Radmilović *et al.* 1996, 2003, 2005a y 2005b) y en menor medida por Kozan (1997a) o Altioik (2000).

El caso de llegada en grupo de buques adquiere especial importancia en casos reales como los puertos fluviales o canales (Radmilović, 1992) en los cuáles la llegada de buques se produce en convoyes o en el que las mercancías se transportan por barcazas remolcadas en grupos.

Este autor aborda estos casos encontrando una relación entre los parámetros de las llegadas en grupos variables y el número de barcos o barcazas necesarios en los convoyes.

Utilizan como base los estudios de llegada en grupo desarrollados previamente a su incorporación a la planificación portuaria por Kabak, (1968 y 1970) y Kimura y Ohson (1984) dando resultados sobre las necesidades de atraque en estos sistemas y presentando gráficas y tablas de interpretación de los resultados obtenidos.

Más tarde, el propio Radmilović (1996) amplía el campo de aplicación de sus estudios anteriores (centrados en determinar el número de atraques necesarios) para abordar procesos de optimización del diseño de las áreas de almacenamiento y de los medios de manipulación necesarios en ciertas terminales.

Para ello supone que la mercancía llega a las terminales en unidades de carga y/o elementos de carga fraccionada (*palets*, contenedores, plataformas, planchas, lingotes, etc.) y el servicio es prestado con un determinado número de elementos de manipulación (grúas, tractores, elevadores, etc.).

Los estudios de este autor se centran históricamente en resolución de sistemas del tipo $M(n=cte)/M/N$ (es decir la llegada de grupos se producen con distribución Poisson y estos grupos son atendidos según leyes de servicio con distribución exponencial; siendo el tamaño de los grupos constantes de "n" elementos) pero más tarde el propio Radmilović *et al.* (2005), amplían sus investigaciones para considerar sistemas del tipo $M(X=\hat{a})/M/N$ y $M(n=cte)/E_k/N$, es decir variaciones al anterior en el que bien las leyes de servicio siguen una función Erlang de fase k (pero permanece constante el número de elementos en el grupo), bien el número de elementos del grupo es una función estadística con una media de "a" elementos (siendo ambas; servicio y llegadas exponenciales).

Esta última referencia bibliográfica resulta además interesante porque aborda la resolución de los sistemas con llegadas en grupo desde la perspectiva de las funciones de coste (ver el apartado 6 del presente anejo) mediante el estadístico que define como:

$$S_c = U_p \cdot T_e \cdot N + s_s \cdot T_e \cdot L \quad (146)$$

Siendo :

S_c = Coste anual de un sistema con “N” servidores;

T_e = Periodo de análisis, usualmente 365 días;

s_p = Coste diario del servidor (en nuestro caso muelle terminal) (USD/día) que sería equivalente al parámetro U_p que se había definido en el apartado anterior como coste unitario portuario;

s_s = Coste diario del usuario (en nuestro caso buque) (USD/día) que sería equivalente al parámetro U_b que se había definido en el apartado anterior como coste unitario del buque;

L = Número medio de usuarios presentes en el sistema (tanto en cola como en servicio).

Nótese que la ecuación anterior es equivalente a la ecuación que había proporcionado Nicolau (1967):

$$C1 = C_{v,b} + C_p = U_b \cdot \lambda \cdot W_q + U_p \cdot N \quad (132)$$

pero pasando de costes unitarios a coste total al multiplicar por T_e , es decir:

$$S_c = (133) \cdot T_e = (U_b \cdot \lambda \cdot W_q + U_p \cdot N) \cdot T_e \quad (147)$$

Estos autores presentan los resultados en formas de tablas en función del ratio de coste específico (“ R_c ”) y la intensidad de tráfico; siendo definido el ratio de coste específico como:

$$R_c = \frac{S_c}{s_s \cdot T_e} = \frac{s_p}{s_s} \cdot N + L = r_{ps} \cdot N + L \quad (148)$$

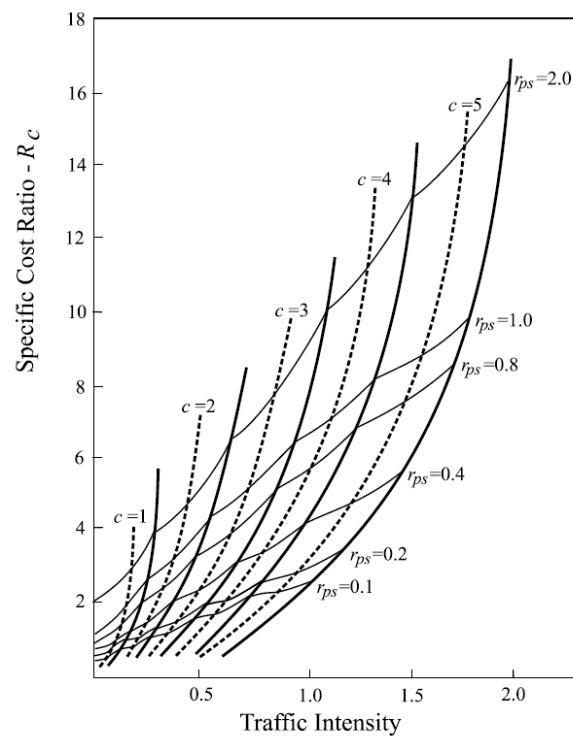
Que resulta de dividir los dos lados de la ecuación (148) por el factor $s_s \cdot T_e$

y donde:

r_{ps} = ratio de coste entre el servidor (muelle) y el usuario (barco) (ratio que se llamaba A/B cuando se presentaba del método de capacidad económica).

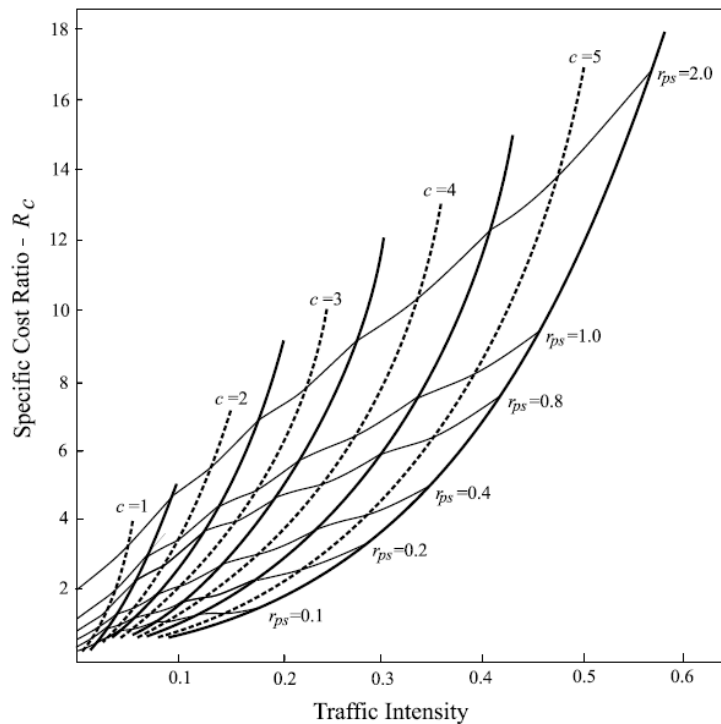
Como ejemplos prácticos presenta tablas para los casos de 2 y 6 servidores ($N=2$ y $N=6$) que se muestran a continuación y donde “c” es el número de atraques o servidores:

Ilustración 372. Curva de capacidad óptima de servidores en el caso de grupos de 2 clientes $M(2)/M/c$.



Fuente: Radmilovic *et al.* (2005).

Ilustración 373. Curva de capacidad óptima de servidores en el caso de grupos de 6 clientes (M(6)/M/c).



Fuente: Radmilovic *et al.* (2005).

De estas gráficas se llega a las siguientes conclusiones que son coherentes cualitativamente con los sistemas simples en los que las llegadas no se producen en grupo:

- Cuanto mayor es el ratio relativo de costes del muelle respecto al buque (r_{ps}) mayor es la intensidad de tráfico que puede permitirse;
- Cuanto mayor es el número de atraques (c) mayor es también la intensidad de tráfico / capacidad óptima del sistema;
- El ratio específico de coste (R_c) crece con la intensidad de tráfico pues obviamente lo hacen las esperas y por tanto los costes soportados por el usuario (buque);
- A igualdad ratio de coste específico (R_c) y número de muelles (c) el tamaño del grupo “n” juega en contra de la intensidad de tráfico (mayores tamaños de grupo llevan a menores intensidades de tráfico óptimas).

Bibliografía

1. Agerschou, H. (1984). Planning and design of Port and Marine Terminals. Thomas Telford Publishing. London (1ª Edición 1984, 2ª Edición 2004). 446 Páginas. ISBN-0-7277-3224-
2. Altioik, T.(2000). *Tandem queues in bulk port operations*. Annals of Operations Research, vol. 93(1): 1–14. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] [doi:10.1023/A:1018915605231](https://doi.org/10.1023/A:1018915605231)
3. Baskett, F.; Chandy, K.M.; Munzt, R.R. y Palacios, F.G. (1975). *Open Closed, and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers*. Journal of the Association for Computing Machinery vol. 22(2): 248-260. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] <http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~cs266/sp10/readings/baskett75.pdf>
4. Berg-Andreassen, J. A, y Prokopowicz, A. K. (1992). *Conflict of interest in deep-draft anchorage usage-applications of QT*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, vol. 118(1): 632-641. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1992\)118:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:1(75))
5. Binkowski, M. y McCarragher, B. (1999). *A queueing model for the design and analysis of a mining stockyard*, Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application, vol. 9(1): 75-98. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1023/A:1008397332376](https://doi.org/10.1023/A:1008397332376)
6. Brant, E. (1961). *Discussion of Prediction of Maximum Practical Berth Occupancy by Thomas J. Fratar*. Alvin S. Goodman and Austin. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1961, vol. 126 (4), pp: 642.
7. Brockmeyer, E.; Halstrøm, H.L.; Erlang, A.K. y Jensen A. (1948). *The life and works of A.K. Erlang*. The Copenhagen Telephone Company. Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences. Copenague (Dinamarca). 275 Páginas.
8. Brown, J.F. (1967). Comments on a Paper by A. Novaes and E. Frankel “A Queueing Model for Unitized Cargo Generation”. Operations Research. Vol. 15(3): 572-575.
9. Canonaco, P.; Legato, P.; Mazza, R. y Musmanno, R. (2008). *A queueing network model for the management of berth crane operations*. Computers & Operations Research, vol. 35(8): 2432-2446. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.001>

-
10. Chu, C. Y. y Huang, W. C. (2002). *Aggregates cranes handling capacity of container terminals: the port of Kaohsiung*. Maritime Policy and Management, vol. 29(4): 341-350. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1080/03088830210144314](https://doi.org/10.1080/03088830210144314)
 11. Cooper, R.B. y Murray G. (1969). *Queues Served in Cyclic Order*. The bell system Technical Journal March 1969, pp: 675-689. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] http://www.cse.fau.edu/~bob/publications/Cooper_1970.pdf
 12. Cosmetatos, G. P. (1975). *Approximate explicit formulae for the average queueing time in the processes (M/D/r) and (D/M/r)*. INFOR, Information Systems and Operational Research, vol. 13(3): 328-331. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1080/03155986.1975.11731618](https://doi.org/10.1080/03155986.1975.11731618).
 13. Cosmetatos, G. P. (1976). *Some approximate equilibrium results for the multiserver queue (M/G/r)*. Operational Research Quarterly, 1976, vol. 27(3). 615-620.
 14. Crow, E.L.; Frances, A.D. y Margaret, W.M. (1960). *Statistics Manual with examples taken from Ordnance Development*. Dover Publications, Inc. Nueva York (Estados Unidos), pp: 83-106. ISBN-13: 978-0486605999. (320 páginas).
 15. Daganzo, C. F. (1990b). *The productivity of multipurpose seaport terminals*. Transportation Science, vol. 24(3): 205-216. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1287/trsc.24.3.205](https://doi.org/10.1287/trsc.24.3.205)
 16. Daskin, M. y Walton, C.M. (1983). *An approximate analytic model for supertanker lightering operations*. Transportation Research B vol. 17 (3): 201-219. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(83\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0191-2615(83)90015-2)
 17. Dragović, B.; Park, N. K. y Radmilović, Z. (2006a). *Ship-berth link performance evaluation – simulation and analytical approaches –*. Maritime Policy & Management, vol. 33(3): 281-299. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/233548170_Ship-berth_link_performance_evaluation_Simulation_and_analytical_approaches
 18. Dragović, B.; Zrnić N. Dj. y Radmilović, Z. (2006b). *Ports & container terminals modeling*. Research Monograph, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, 2006.
 19. Dragović, B.; Zrnić, Dj. N.; Twrdy, E. y Rooy, D.K. (2010). *Ship traffic modelling and performance evaluation in container port*. Analele Universităţii "Eftimie Murgu", 2010, XVII(2), 127-138. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/227635704_Ship_Traffic_Modeling_and_Performance_Evaluation_in_Container_Port

20. Dragovic, B. y Zrnic, N. (2011). *A Queueing Model Study of Port Performance Evolution*. Analele Universității "Eftimie Murgu", vol. XVIII, NR. 2, 2011, pp: 65-76. ISSN 1453 – 7397.- Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/227635708_A_Queueing_Model_Study_of_Port_Performance_Evolution
21. Drew, D.; Adulbhan, P.; Woo, W.L. y Juaseekoon, M. (1972). *Capacity-feedback relationship for port of Bangkok*. Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, vol. 98(3), 393-415.
22. Easa, M.S. (1987). *Approximate queueing models for analyzing harbor terminal operations*. Transportation Research B, vol. 21(4): 269-286. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261587900270>
23. Edmon, E.D. (1975). Operating Capacity of Container Berths for scheduled services by Queue Theory. The Dock and Harbor Authority, vol. 56(161): 230-234.
24. Edmond, E. D y Maggs, R. P (1976). *Container ship turnaround times at UK ports*. Maritime Policy & Management 4(1): 3-19 · Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: 10.1080/03088837600000033
25. Edmond, E. D y Maggs, R. P (1978). *How Useful Are Queue Models in Port Investment Decisions for Container Berths?* Journal of the Operational Research Society, Vol. 29, 1978, pp. 741–750. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: 10.1057/jors.1978.162
26. El-Naggar, M.E. (2010). *Application of queueing theory to the container terminal at Alexandria Port*. Journal of Soil Science and Environmental Management, vol. 1(4): 77-85, (ISSN 2141-2391). Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] http://www.academicjournals.org/article/article1380016152_El-Naggar..pdf
27. Enríquez, F. (1968). *Problemática de la congestión portuaria*. Revista de Obras Públicas, vol. 115(I): 351-360. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1968/1968_tomoI_3037_03.pdf
28. EPPE (2012). Autores: Llorca, J.; González –Herreno, J.M. y Ametller, S. (2012). *ROM 2.1-2011: Obras de Atraque y Amarre. Tomos I y II. Serie de Recomendación de Obras Marítimas*. Organismo Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento de España). Tomo I (48 Páginas), Tomo II (468 Páginas). ISBN 978-84-99875-40-9 (Tomo I) 978-84-88975-78-2 (Obra Completa). Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%202.0-11.pdf>

-
29. Fratar, T.J.; Goodman, A.S. y Brant, A. E. (1960). *Prediction of Maximum Practical Berth Occupancy*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbours Division. ASCE, vol. 86 (2): 69-78.
 30. Gökkus, Ü. (1995). *Application of queuing theory on the design of fishing harbors*. Transactions on the Built Environment – Marine Technology and Transportation, vol. 11(1995): 711-719. ISSN 1743-3509. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/MT95/MT95083FU.pdf>
 31. Goldsman, D. y Nelson, B.L. (1994). *Ranking, selection and multiple comparisons in computer simulation*. Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference. Lake Buena Vista (Florida, Estados Unidos). Editado por J.D.Tew, S. Manivannan, D. Sadowski, y A.F. Seila. pp: 192-199. Disponible en [fecha de último acceso el 05.11.2017] http://informs-sim.org/wsc94papers/1994_0026.pdf
 32. Goodchild, A. y Mohan, K. (2008). *The clean trucks program: Evaluation of policy impacts on marine terminal operations*. Maritime Economics and Logistics, vol. 10(4): 393–408. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1057/mel.2008.13](https://doi.org/10.1057/mel.2008.13)
 33. Gordon, W.T. y Newell, G.F. (1967). *Closed Queuing Systems with Exponential Servers*. Operations Research, vol. 15(2): 252-265. Disponible en [fecha de último acceso el 10.06.2017] <https://doi.org/10.1287/opre.15.2.254>
 34. Gransberg, D.D. y Basilloto, P.J. (1998). *Cost engineering optimum seaport capacity*. Cost Engineering, vol. 40(9): 28-32. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://works.bepress.com/douglas_gransberg/6/
 35. Griffiths, J. D. (1976). *Optimal handling capacity at a berth*. Maritime Policy and Management, vol. 3(3): 163-167. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1080/03088837600000004](https://doi.org/10.1080/03088837600000004)
 36. González, J.M. (2006). *ROM 2.1: Obras de Atraque y Amarre. Capítulo 3 (Documento de trabajo predefinitivo de Julio 2006). Criterios de Proyecto*. EROM2. Documento Interno de trabajo de la Comisión redactora de la ROM 2.1: Obras de Atraque y Amarre. Ente Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento del Gobierno de España). 65 Páginas.
 37. Guan, C. y Liu, R.R. (2009). *Container terminal gate appointment system optimization*. Maritime Economics & Logistics, vol. 11(4): 378–398. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1057/mel.2009.13](https://doi.org/10.1057/mel.2009.13)

38. Heaver, T. y Studer, K.R. (1972). *Ship size and turn-around time - some empirical evidence*. Journal of Transport Economics and Policy, vol. 6(1): 32-50. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] http://www.bath.ac.uk/e-journals/jtep/pdf/Volume_V1_No_1_32-50.pdf
39. Hill, D.C. (1961). *Discussion of Prediction of Maximum Practical Berth Occupancy by Thomas J. Fratar, Alvin S. Goodman and Austin E. Brant Jr.* Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbours Division. ASCE, vol. 126 (4): 642.
40. Huang, W.-C. (1990). *A research on the characteristics of port system*. Transportation scheme Quaterly Periodical, vol. 19(2): 241-268 (1990).
41. Huang, W.-C. y Wu, S.C. *The estimation of the initial number of berths in a port system based on cost function*. Journal of Marine Science and Technology, vol. 13(1): 35-45 (2005). Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/13-1/35-45.pdf>
42. Huang, W.-C.; Chishaki, T., y Li, G. (1995). *A Study on the Container Port Planning by Using Cost Function with IND Based on M/E_K/N System,* Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 1(1): 263-276.
43. Huang, W.-C.; Kuo, T.-C.; Wu, S.-C. y Li, G. (2007). *Evaluation of operation performance for container terminal from micro point view*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 7(1): 3103-3118. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/easts/7/0/7_0_3103/_pdf
44. Huang, W.-C.; Kuo, T.-C.; Wang, J. y Wu, C.-T. (2010). *A Research of the Improvement Strategy of the Operation Performance of Container Terminal*. Proceedings of the Eastern Society for Transportation Studies, vol. 8 (2010): 2256-2271. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/easts/8/0/8_0_2256/_pdf
https://www.jstage.jst.go.jp/article/easts/8/0/8_0_2256/_pdf
45. Huang, W.-C.; Kuo, T.-C.; Wu, C.-T. y Kuo, C.-C. (2012). *Port Management Improvement Strategies based on Simulation Model*. Journal of Marine Science and Technology, vol. 20(5): 492-507. DOI: 10.6119/JMST-011-0426-1Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/20-5/492-507.pdf>
46. Jackson, J.R. (1963). *Jobshop-like Queuing Systems*. Management Science, vol. 10(1): 131-142. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/296776.pdf>

-
47. Jagerman, D. y Altioik, T. (2003). *Vessel arrival process and queueing in marine ports handling bulk materials*. Queueing systems, vol. 45(3), 223-243. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] [doi>10.1023/A:1027324618360](https://doi.org/10.1023/A:1027324618360)
 48. Jansson, J. O. y Shneerson, D. (1982). *Port Economics*. MIT Press, Masacchuset (Estados Unidos). 194 Páginas. ISBN-10: 0262100258 y ISBN-13: 978-0262100250.
 49. Jones, J. H., y Blunden, W. R. (1968). *Ship turn-around time at the port of Bangkok*. Journal of the Waterways and Harbors Division, vol. 94(2): 135-148.
 50. Kabak, I.W. (1968). *Blocking and Delays in M(n)/M/c Bulk Queueing Systems*. Operations Research, vol. 16(4): 830-840. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] [doi>10.1287/opre.16.4.830](https://doi.org/10.1287/opre.16.4.830)
 51. Kabak, I.W. (1970). *Blocking and delays in M^x/M/c bulk arrival queueing systems*. Management Science, vol. 17(1): 112-115. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] [DOI: 10.1287/mnsc.17.1.112](https://doi.org/10.1287/mnsc.17.1.112)
 52. Kang, S.; Medina, J.C. y Ouyang, Y., (2008). *Optimal operations of transportation fleet for unloading activities at container*. Transportation Research, vol. 42(10): 970-984. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.003>
 53. Kendall, D.G. (1948). *On the role of variable generation time in the development of a sthochastic birth process*. Biometrika, vol. 35(3/4): 316-330. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] <http://www.jstor.org/stable/2332354>.
 54. Kendall, D.G. (1951). *Some problems in the theory of queues*. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), vol. 13(2): 151-173 y 184-185 (1951). Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] : <http://www.jstor.org/stable/2984059>
 55. Kendall, D.G. (1953). *Stochastic Processes occurring in the Theory of Queues and their analysis by the method of the imbedded Markov Chain*. The Annals of Mathematical Statistics, vol. 24(3): 338-354. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] <http://www.jstor.org/stable/2236285>
 56. Khintchine, A. (1932). *Mathematisches über die Erwartung vor einem öffentlichen Schalter*. Rec. Math., vol. 39(4): 73-84.
 57. Kia, M.; Shayan, E. y Ghotb, F. (2002). *Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation*. Computers and Industrial Engineer. Vol. 42 (2-4):

- 533-540. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00051-7)
58. Kiani, M.; Bonsall, S.; Wang, J. y Wall, A. (2006). A break-even model for evaluating the cost of container ships waiting times and berth unproductive times in automated quayside operations. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 2006, vol. 5(2): 153-179. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1007/BF03195102](https://doi.org/10.1007/BF03195102)
 59. Kiekhäfer, A.P. (2011). *Simulation, ranking and selection procedures and applications in network reliability design*. PhD Thesis supervisada por Y. Chen. Universidad de Iowa (Estados Unidos). 132 páginas. Disponible en [fecha de acceso 19.11.2017] <http://ir.uiowa.edu/etd/998/>
 60. Kimura T. y Ohson T. (1984). *A Diffusion Approximation for an M/G/m Queue with Group Arrivals*. *Management Science*, vol. 30(3): 381 - 388. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] <http://www.jstor.org/stable/2631810>
 61. Kimura, T. (1991). *Refining Cosmetatos' approximation for the mean waiting time in the M/D/s queue*. *Journal of Operational Research Society*, vol. 42(7): 595-603. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] doi:[10.1057/jors.1991.119](https://doi.org/10.1057/jors.1991.119)
 62. Koenigsberg, E. y Lam, R. (1976). *Cyclic queue models of fleet operations*. *Operations Research*, vol. 24(3): 516-529. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <https://doi.org/10.1287/opre.24.3.516>
 63. Kozan, E. (1994). *Analysis of the economic effects of alternative investment decisions for seaport systems*. *Transportation Planning and Technology*, vol. 18(3): 239-248. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1080/03081069408717546](https://doi.org/10.1080/03081069408717546).
 64. Kozan, E. (1997a). *Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container terminals*. *Transportation Planning and Technology*, vol. 20(3): 235-248. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03081069708717591>
 65. Kozan, E. (1997b). *Increasing the operational efficiency of container terminals in Australia*. *The Journal of Operational Research Society*, 1997, 48(2): 151-161. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] doi:[10.1057/palgrave.jors.2600348](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600348)
 66. Kuo, T.-C.; Huang, W.C.; Wu, S.-C. y Cheng, P.L. (2006). *A case study of Inter-arrival time distributions of containers ships*. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 14 (3): 155-164. . Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/14-3/155-164.pdf>

-
67. Kuo, T.C.; Huang, W.C.; Wu, S.-C. y Cheng, P.L. (2006). *A case study of interarrival time distributions of container ships*. Journal of Marine Science and Technology, vol. 14(3): 155-164. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/14-3/155-164.pdf>
68. Lagoudis, I.N. y Platis, A.N. (2009). *Using birth-and-death theory for container terminal strategic investment decisions*. International Journal of Decision Sciences, Risk and Management, vol. 1(1/2): 81-103. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <https://doi.org/10.1504/IJDSRM.2009.027248>
69. Laih, C.H. y Sun, P.Y. (2010). *Queuing pricings to bulk carriers at the anchorage*. Asian Transport Studies, vol. 1(1): 62-75. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/eastpro/2009/0/2009_0_33/_pdf
70. Lan, L.W. y Teng, J.Y. (1990). *Applications of the M/M/S Queuing System to Determine the Optimal Number of Berths*. Journal of Chinese Institution of Civil and Hydraulic Engineers. vol. 2(4): 369-375.
71. Legato, P. y Mazza, R. (2001). *Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation*. European Journal of Operational Research, vol. 133 (3): 537-547. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00200-9)
72. Legato, P.; Canonaco P. y Mazza, R. (2009). *Yard crane management by simulation and optimization*. Maritime Economics & Logistics, vol. 11(1): 36–57 Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [doi:10.1057/mel.2008.23](https://doi.org/10.1057/mel.2008.23)
73. Lindley, D.V. (1952). *The theory of queues with a single server*. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, vol. 48(2): 277-289. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] [DOI: 10.1017/S0305004100027638](https://doi.org/10.1017/S0305004100027638)
74. López I.; Camarero Orive, A.; Negro Valdecantos, V. y González N. (2011). *Terminales multicliente vs terminales dedicadas – Estudio del caso del puerto de Valencia*. Conferencia Anual de la Asociación Internacional de Economistas Marítimos IAME 2011 Latino América. 25 a 28 de Octubre de 2011, Santiago de Chile (Chile).). Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] http://oa.upm.es/16328/1/IAME_2011-UPM.pdf
75. Martín, A.M (2012). *The Capacity in Container Port Terminals*; UNCTAD Ad Hoc Expert Meeting on Assessing Port Performance, 12 de Diciembre de 2012. Ginebra (Suiza) Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] http://unctad.org/meetings/en/Presentation/dtl_ttl_2012d10_Soberon.pdf

-
76. Mavrikakis, D. y Kontinakis, N. (2008). *A queueing model of maritime traffic in Bosporus Straits*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16(1): 315–328. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.11.013>
77. Mennis, E.; Platis, A.; Lagoudis, I.N. y Nikitakos, N. (2008). *Improving port container terminal efficiency with the use of Markov theory*. Maritime, Economics & Logistics, vol. 10(3): 243–257. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [doi:10.1057/mel.2008.3](https://doi.org/10.1057/mel.2008.3)
78. Mettam, J.D. (1967). *Forecasting delays to ships in ports*. The Dock and Harbor Authority. Londres (Reino Unido). Vol. XLVII. No 558 (Abril 1967), pp: 380-382
79. Miller, A. J. (1971). *Queuing at single-berth shipping terminal*. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, vol. 97(1), 43- 56.
80. Munisamy, S. (2010). *Timber terminal capacity planning through queuing theory*. Maritime Economics & Logistics, vol. 12(1): 147-161. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://umexpert.um.edu.my/file/publication/00001676_57724.pdf
81. Newell, G.F. (1982). *Applications of Queuing Theory*. Chapman and Hall, New York. 3030 Páginas. ISBN-13: 978-9400959729. Reimpreso en 2013 por Springer. Ettore Majorana International Science Series (Book 4)
82. Nicolau, S.N. (1967). *Berth Planning by Evaluation of Congestion and Cost*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of Waterways and Harbours Division. ASCE, Vol. 93(4), pp. 107-132.
83. Nicolaou, S.N. (1969). *Berth planning by evaluation of congestion and cost*. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1969, 95(3): 419-425.
84. Noritake, M. (1978). *A Study on Optimum Number of Berths in Public Wharf*. Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, Vol. 278(1978): 113-122 (1978). Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] http://doi.org/10.2208/jscej1969.1978.278_113
85. Noritake, M. y Kimura (1980). *A Study on Optimum Number of Berths in Public Wharf*. Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, Vol. 301(1980): 115-123. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] http://doi.org/10.2208/jscej1969.1980.301_115
86. Noritake, M. y Kimura, S. (1983a). *Congestion Cost and Pricing of Seaports*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers

- (ASCE)vol. 111(2): 354-370. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(354\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(354))
87. Noritake, M. y Kimura, S., (1983b). *Optimum Number and Capacity of Seaport Berths*. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering. - ASCE, Vol. 109(3): 323-329 Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] (DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1983\)109:3\(323\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1983)109:3(323))).
88. Noritake, M. (1985). *Congestion cost and pricing of seaports*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, vol. 111(2): 354-370. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(354#sthash.QEAbH0m5.dpuf](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(354#sthash.QEAbH0m5.dpuf)
89. Noritake, M. y Kimura, S., (1990). *Optimum Allocation and size of seaports*. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering. - ASCE, Vol. 116(2):287-299 Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1990\)116:2\(287\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-950X(1990)116:2(287))
90. Novaes, A. y Frankel, E. (1966). *A queuing modelling for unitilized Cargo Generation*. Journal of Operations Research, vol. 14(1): 100-132 Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] <https://doi.org/10.1287/opre.14.1.100>
91. Page, E. (1972). *Queueing Theory in OR*. Butterworths, London. ISBN 0844800163 (196 páginas)
92. Page, E. (1982). *Tables of waiting times for M/M/n, M/D/n and D/M/n and their use to give approximate waiting times in more general queues*. Journal Operational Research Society. Vol. 33(5): 453 – 473. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] DOI: [10.1057/jors.1982.94](https://doi.org/10.1057/jors.1982.94)
93. Plumlee, C.H. (1966). *Optimum Size Seaport*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers Journal of Waterways and Harbours Division. ASCE, Vol. 92 (3): 1-24.
94. Pollazzek, F. (1930a). *Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie*. Mathematische Zeitschrift., vol. 32 (1): 64-100 y 729-750 (1930). Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] DOI [10.1007/bf01194620](https://doi.org/10.1007/bf01194620).
95. Pollazzek, F. (1930b). *Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie II (Mitteilung aus dem Telegraphentechnischen Reichsamt)*. Mathematische Zeitschrift., vol. 32(1): 64-100. ISSN: 0025-5874; 1432-1823.). Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] <http://eudml.org/doc/168256>

96. Pollazzek, F. (1934). *Über das Wasserproblem*. Mathematische Zeitschrift, vol. 38(1): 492-537
97. Pollazzek, F. (1952) *Fonctions caractéristiques de certaines répartitions définies au moyen de la notion d'ordre*. Comptes rendus de l'Académie des Sciences (C.R. Acad. Sci.), Paris (Francia), vol. 234 (1952) : 2334-2336.
98. Radmilović, Z. (1992). *Ship-berth link as bulk queueing system in ports*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 118(5): 474-495. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1992\)118:5\(474\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:5(474))
99. Radmilović, Z.; Hrle, Z. y Muškatirović, J., V. (2003). *Power unit - cargo space link in inland waterway navigation*. Journal of Advanced Transportation, vol. 37(1): 119-138. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1002/atr.5670370106](https://doi.org/10.1002/atr.5670370106)
100. Radmilović, Z.; Čolić, V. y Hrle, Z. (1996). *Some Aspects of Storage and Bulk Queueing Systems in Transport Operation*. Transportation Planning and Technology, vol. 20(1): 67-81. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1080/03081069608717580](https://doi.org/10.1080/03081069608717580)
101. Radmilović, Z.; Hrle, Z. y Muškatirović, J.V. (2003). *Power unit - cargo space link in inland waterway navigation*. Journal of Advanced Transportation, vol. 37(1): 129-138. Disponible en [fecha de último acceso el 10.06.2017] DOI: [10.1002/atr.5670370106](https://doi.org/10.1002/atr.5670370106)
102. Radmilović, Z.; Dragović, B. y Maras, V. (2005a). *Power unit – cargo space link in transport*. Yugoslav Journal of Operations Research, vol. 15(1): 49-52. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-0243/2005/0354-02430501049R.pdf>
103. Radmilović, Z.; Dragović, B. y Meštrović, R., (2005b). *Optimal number and capacity of servers in $MX=a^-/M/c(\infty)$ queueing systems*. International Journal of Informatics and Management Sciences, vol. 16(3): 1-17. Disponible bajo petición en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/265318381_Optimal_number_and_capacity_of_servers_in_M_Xa_Mc_queueing_systems
104. Radmilović, Z.; Maras, V. y Jovanovic, S. (2007) *Ship Lock as General Queueing System with Batch Arrivals and Batch Service*. Promet - Traffic - Traffico 19(6):343-352. Disponible en [fecha de último acceso el 10.06.2017] DOI: [10.7307/ptt.v19i6.969](https://doi.org/10.7307/ptt.v19i6.969)

-
105. Rodríguez, F. (1985). *Dirección y Explotación de Puertos*. Imprenta Industrial S.A. Bilbao (España). (Patrocinado por el Puerto Autónomo de Bilbao) ISBN 84.505-2633-7. 488 páginas.
 106. Sabria F. y Daganzo C.F. (1989). *Approximate Expressions for Queueing Systems with Scheduled Arrivals and Established Service Order*. Transportation Science, vol. 23(3): 159-165. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1287/trsc.23.3.159](https://doi.org/10.1287/trsc.23.3.159)
 107. Sacone, S. y Siri, S. (2009). *An integrated simulation-optimization framework for the operational planning of seaport container terminals*. Mathematical and Computer Modeling of Dynamical System, vol. 15(3): 275-293. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13873950902808636>
 108. Saeeda, N. y Larsenb, O.I. (2013). Application of queueing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines. Case Studies on Transport Policy, vol. 4(2): 143–149. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2016.02.001>
 109. Sakasegawa, H. y Yamazaki, G. (1977). *Inaqualities and and approxximation formula for the mean delay time in tandem queueing systems*. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, vol. 29(1): 445-466. 143–149. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] [doi:10.1007/BF02532805](https://doi.org/10.1007/BF02532805)
 110. Schonfeld, P. y Sharafeldien, O. (1985). *Optimal berth and crane combinations in containerports*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 111(6): 1060-1072. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:6\(1060\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:6(1060))
 111. Shabayek, A.A. y Yeung, W.W. (2000). *A queueing model analysis of the performance of the Hong Kong container terminals*, Transportation Planning and Technology, vol. 23(4): 323-351. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03081060008717656>
 112. Smith, W.L. (1953). *On the distribution queueing times*. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 49(03): 449-461. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] DOI: [10.1017/S0305004100028620](https://doi.org/10.1017/S0305004100028620)
 113. Taniguchi, E.; Noritake, M.; Yamada, T. y Izumitani, T. (1999). *Optimal size and location planning of public logistics terminals*. Transportation research part E, vol. 35(3): 207-222. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017]

http://directory.umm.ac.id/Data%20Elmu/jurnal/T/Transportation%20Research_Logistics%20&%20Transportation%20Review/Vol35.Issue3.Sept1999/75.pdf

114. Tsinker, G.P. (2004). *Port Engineering: Planning, Construction, Maintenance, and Security*. Ed. Wiley; (1 edición – 16 Febrero 2004) (ISBN-10: 0471412740. ISBN-13: 978-0471412748). 896 páginas.
115. UNCTAD (1987) (ponencia de G. de Monie). *Measuring and evaluating port performance and productivity*. United Nations Conference on Trade & Development (UNCTAD). Monografía nº 6 de la UNCTAD sobre Gestión de Puertos, Ginebra (Suiza). 60 páginas Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] http://unctad.org/en/Docs/ship4946_en.pdf
116. UNCTAD (1979). *Port Development: a Handbook for Planners in Developing Countries*. United Nations Conference on Trade & Development (UNCTAD). United Nations, Nueva York (1985). 226 Páginas. ISBN-10: 011905602X; ISBN-13: 978-0119056020.
117. UNCTAD (1985). *Port Development: a Handbook for Planners in Developing Countries* (2nd Edition). United Nations Conference on Trade & Development (UNCTAD). United Nations, Nueva York (1985). 241 Páginas. ISBN-10: 9211121604; ISBN-13: 978-9211121605
118. UNCTAD (1988) (ponencia de G. de Monie). *Medición y Evaluación del rendimiento y productividad de los puertos*. United Nations Conference on Trade & Development (UNCTAD). Monografía nº 6 de la UNCTAD sobre Gestión de Puertos, Ginebra (Suiza). 68 páginas. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017]. http://unctad.org/es/Docs/ship4946_sp.pdf
119. Van Hee, K.M. y Wijbrands, R.J. (1988). *Decision Support System for Container Terminal Planning*. European Journal of Operations Research, vol. 34 (3): 26-272. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 10.06.2017] [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90147-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90147-6)
120. Vianen, T.A. van; Ottjes, J.A. y Lodewijks, G. (2012). *Modeling the arrival process at dry bulk terminals*. Delft University of Technology. Faculty 3ME, Transport Engineering & Logistics. Disponible en [fecha de último acceso el 05.06.2017] <http://www.exspecta.nl/wp-content/uploads/2015/10/Modeling-arrival-process-at-dry-bulk-terminals.pdf>
121. Volberg, O. (1939). *Problème de la queue stationnaire et nonstationnaire*. Docklady Akad. Nauk USSR, Vol. 24(1939): 657-661.

-
122. Wanhill, S.R.C. (1974a). *Further Analysis of Optimum Size Seaport*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. ASCE. Vol. 100(4), pp. 377-383.
 123. Wanhill, S.R.C. (1974b). *A study in port planning: The example of Mina Zayed*. Maritime Studies and Management, vol. 2(1), 48-55. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03088837400000033>.
 124. Weille, J. de (1968). *The optimum number of berths of a port*. International Bank for Reconstruction and Development. Economics Department Working Paper N° 19. 45 Páginas. Disponible en [fecha de ultimo acceso el 05.05.2017] <http://documents.worldbank.org/curated/en/988421468764704670/pdf/multi0page.pdf>
 125. Weille, J. de y Ray, A. (1974). *The optimum Port Capacity*. Journal of Transport Economics and Policy, vol. 8(1): 244 – 259.
 126. Yamada, T.; Frazila, R.B.; Yoshizawa, G. y Mori, K. (2003). *Optimising the handling capacity in a container terminal for investigating efficient handling systems*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 5(1): 597-608. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalip1984/19/0/19_0_683/_pdf
 127. Zrnić, N. Dj.; Dragović, B. y Radmilović, Z. (1999). *Anchorage-ship-berth link as multiple server queuing system*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 125(5): 232-240. Disponible en [fecha de último acceso el 05.05.2017] DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1999\)125:5\(232\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:5(232))

Bibliografía Completa

Bibliografía Completa

1. Abd El-Nasser A Said, A. E-N.A G.; Mahmoud, A.M. y El-Horbaty, E.-S. M. (2014a). *Solving container terminals problems using computer-based modeling*. Computer Science Department, Faculty of Computer & Information Sciences, Ain Shams University (Egypt). Disponible en [fecha de acceso 26.01.2017] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.6384.pdf>
2. Abd El-Nasser A Said, Mahmoud, A.M. y El-Horbaty, E.-S. M. (2014b). *Simulation and optimization of container terminal operations: A case study*. International Journal of Computer Science Engineering and Information Technology Research (IJCSEITR), vol.4(4): 85-94. Disponible en [fecha de acceso 26.01.2017] <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.6257.pdf>
3. Abdel-Fattah, A.K.; El-Tawil, A.B. y Harraz, N.A. (2013). *An Integrated Operational Research and System Dynamics Approach for Planning Decisions in Container Terminals*. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, vol. 7 (10): 908-914. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://waset.org/publications/17095/an-integrated-operational-research-and-system-dynamics-approach-for-planning-decisions-in-container-terminals>
4. Abdel Hafez, M. A y Eltawil, A. (2013). *Berth allocation and quay crane assignment in Port Said port with convoy consideration in Suez Canal*. The International Maritime Transport & Logistic Conference (MARLOG 2) Sustainable Development of Suez Canal Region, Alexandria, Egypt, 17 - 19 (2013) Disponible en [fecha de acceso 26.12.2016] http://www.academia.edu/4760957/berth_allocation_and_quay_crane_assignment_in_port_said_port_with_convoy_consideration_in_suez_canal
5. Abdel Hafez, M. A.; Hubbard, N.J.; Tipi, N.S. y Eltawil, A.B. (2013). *A Simulation based model for the berth allocation and quay crane assignment problem*. LRN Annual Conference and PhD Workshop 2013, 4th-6th September 2013, Birmingham, Reino Unido Disponible en [fecha de acceso 26.11.2016] http://www.academia.edu/4761020/1_A_Simulation_based_model_for_the_berth_allocation_and_quay_crane_assignment_problem
6. Abdullah, M. (2013). *Mobile robot navigation using potential fields and market based optimization*. Department of Technology, Örebro University (Örebro, Suecia). 111 páginas. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:628458/FULLTEXT01.pdf>

7. Abu-Taieh, E.M.O. y El Sheikh, A.A.R. (2007). *Commercial simulation packages: A comparative study*. International Journal of Simulation, vol. 8(2): 66-76. Disponible en [fecha de acceso 17.06.2017] <http://www.rbcsimulations.com/wp-content/uploads/2011/12/Comparative-Study-Simulation-Softwares.pdf>.
8. Acerbi, C. y Tasche, D. (2001). *Expected shortfall: a natural coherent alternative to value at risk*. Working paper de 9 de Mayo de 2011. Posteriormente publicados en Economic Notes, vol. 31(2): 1-10. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://www.bis.org/bcbs/ca/acertasc.pdf>
9. Acerbi, C. y Tasche, D. (2002). *On the Coherence of Expected Shortfall*. Journal of Banking & Finance, vol. 26(7): 1487–1503. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378426602002832>
10. Acerbi, C.; Nordio, C. y Sirtori, C. (2001). *Expected Shortfall as a Tool for Financial Risk Management*. Working paper (Recurso no publicado). Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://www.pacca.info/public/files/docs/public/finance/Active%20Risk%20Management/ncs.pdf>
11. Adams, M.D. (1989). *A layered Control System for a mobile robot*. Technical Report, Oxford University, Robotics Research Group. Oxford (Reino Unido).
12. Adams, M.D.; HU, H. y Probert, P.J. (1990). *Towards a realtime architecture for obstacle avoidance and path planning in mobile robots*. Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1(1): 584-589. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <https://cswwww.essex.ac.Reino Unido/staff/hhu/Papers/IEEE-ICRA-1990-584-589.pdf>
13. AECOM (2015). *PortOPS: Port Operations Simulation*. AECOM. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 15.09.2017] <http://www.aecom.com/What+We+Do/Transportation/Market+Sectors/Ports+and+Marine/Port+Operations+Simulation>
14. AECOM (2016a). *Port Botany Expansion*. AEMCO. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://www.aecom.com/projects/port-botany-expansion-2/>

15. AECOM (2016b). *Colombo South Container Terminal*. AEMCO. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://www.aecom.com/projects/colombo-south-container-terminal/>
16. AECOM (2016c). *London Gateway Port*. AEMCO. 1999 Avenue of the Stars - Suite 2600. Los Angeles, CA 90067 (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://www.aecom.com/projects/london-gateway-port/>
17. Agarwal, R. y Ergun, O. (2008). *Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping*. Transportation Science, vol. 42(2) :175-196. Disponible en [fecha de acceso 20.05.2017] <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0205>
18. Agerschou, H.; Lundgren, H.; Sörensen, T.; Ernst, T.; Korsgaard, J.; Schmidt, L. R. y Chi. W. K. (1983). *Planning and Design of Ports and Marine Terminals*. John Wiley and Sons, Chichester. ISBN-13: 978-0727734983 y ISBN-10: 0727734989. 464 páginas.
19. Agerschou, H. (1984). *Planning and design of Port and Marine Terminals*. Thomas Telford Publishing. London (1ª Edición 1984, 2ª Edición 2004). 446 Páginas. ISBN-0-7277-3224.
20. Agesen, O.; Frølund, S. y Olsen M.H. (1990). *Persistent and Shared Objects in BETA*. Technical Report IR-89, Computer Science Department, Aarhus University. Aarhus (Dinamarca).
21. Agra, M. (1999). *Decomposition of a combined inventory and time constrained ship routing problem*. Transportation Science, vol. 33(1): 3–16. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.33.1.3>
22. Agra, A.; Christiansen, M y Delgado A (2012) *Mixed integer formulations for a short sea fuel oil distribution problem*. Transportation Science vol. 47(1):108–124. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/trsc.1120.0416>
23. Agra, A.; Andersson, H.; Christiansen, M. y Wolsey, L. (2013). *A maritime inventory routing problem: Discrete time formulations and valid inequalities*. Networks, vol. 62(4): 297–314 (© Wiley Periodicals, Inc.). Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/net.21518/abstract>
24. Agra, A.; Christiansen, M.; Delgado, A.; y Simonetti, L. (2014). *Hybrid heuristics for a short sea inventory routing problem*. European Journal of Operational Research, vol. 263(3): 924-935. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.042>

25. Agra, A.; Christiansen, M. y Delgado, A. (2016). *Discrete time and continuous time formulations for a short sea inventory routing problem*. Optimization and Engineering, vol. 18(1): 269–297. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1007/s11081-016-9319-0](https://doi.org/10.1007/s11081-016-9319-0)
26. Ainouche, A. y Smati A. (2002). *Optimization of LNG Chain by stochastic dynamic programming model*. 17th World Petroleum Congress, 1-5 de septiembre de 2002, Rio de Janeiro (Brasil). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/254550446_Optimization_of_LNG_chain_by_stochastic_dynamic_programming_model
27. Ainouche, A.; Djemmaa, A. y Smati, A (2002). *Reliability of LNG and natural gas transmission chain*. 17th World Petroleum Congress, 1-5 de septiembre de 2002, Rio de Janeiro (Brasil).
28. Ainouche, A. (2003). *Optimization of LNG Chain by Stochastic Model*. 1^{ères} Journées nationales sure le traitement, le stockage, le transport et la distribution des hydrocarbures. Argel (Argelia) (20 Octubre 2003) Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://dalkoom.free.fr/and-inh/activites/comtra/C04.PDF>
29. Ainouche, A. (2004). *Modelling and Optimization of an LNG Chain by Graphs Theory*. Recurso no publicado pero disponible en [fecha de acceso 17.11.2016] <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4215/innhold/LNG%20Conferences/2004/Data/Poster-s-PDF/7-PO-36-Ainouche-2.pdf>
30. Aksoy, S: (2011). *Simulation modelling for Ro-Ro terminals*. Master's thesis Istanbul Technical University, Estambul (Turquía).
31. Alali, K. y Al-Bazi A. (2013). *Management of Container Terminal Operations Using Monte Carlo Simulation*. OR55 Annual Conference-Keynote Papers and Extended Abstracts, pp: 115-121, 3-5 de Septiembre de 2013, Exeter (Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso 20.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/289432624_Management_of_container_terminal_operations_using_Monte_Carlo_simulation
32. Alarcón Hernandez J.A.; Cho S.W. y Pak, M.S. (2012). *Fuel Consumption within Cargo Operations at the Port Industry. A simulation analysis on the case of S Port Company in the Reino Unido*. The Asian Journal of Shipping and Logistics; vol. 28(2): 227-254. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] DOI: [10.1016/j.ajsl.2012.08.005](https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2012.08.005).

-
33. Aleman, D.; Wibisono, T. y Schwartz, B. (2009). *Accounting for Individual Behavior and Demographics in Pandemic Disease Modeling*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (Editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin y R. G. Ingalls), Wiley-IEEE Press, pp: 86-98. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/224124116_Accounting_for_individual_behaviors_in_a_pandemic_disease_spread_model
34. Alexopoulos, C. y Griffin, P.M.(1992). *Path planning for a mobile robot*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 22(2): 318-322. Disponible en [fecha de acceso 08.05.2017] DOI: 10.1109/21.148404
35. Ali, I.; Abouelseoud, Y. y Elwany, M-H. (2011). *Container Terminal Berth allocation and Quay Crane assignment using IP and simulated annealing*. Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering, pp: 31-37.
36. Al-Khayyal, F. y Hwang, S. (2007). *Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk. Part I: Applications and model* Journal of Operational Research vol. 176(1): 106-130. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016]
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.047>
37. Allan, R. (2010). *Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools*. Computational Science and Engineering Department, Version 1.1. STFC Daresbury Laboratory, Daresbury, Warrington WA4 4AD (Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso 07.01.2017] <http://www.grids.ac.Reino Unido/Complex/ABMS/>
38. Allen, T. (2011). *Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling: Voting Systems, Health Care, Military, and Manufacturing*. Springer - Edición: 2011. 228 páginas. ISBN-10: 0857291386. ISBN-13: 978-0857291387.
39. Almaz, O.A. y Altioik, T. (2012). *Simulation modeling of the vessel traffic in Delaware River: Impact of deepening on port performance*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 22(2012): 146-165. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017]
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.12.004>
40. Altioik, T.(2000). *Tandem queues in bulk port operations*. Annals of Operations Research, vol. 93(1): 1–14. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017]
[doi:10.1023/A:1018915605231](https://doi.org/10.1023/A:1018915605231)
41. Altioik, T. y Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Elsevier, Inc., 456 páginas ISBN 978-0-12-370523-5. e-Book, ISBN 9780080548951.

-
42. Álvarez J.F.; Longva, T. y Engebretsen E.S. (2010). *A methodology to assess vessel berthing and speed optimization policies*. Maritime Economics & Logistics, vol. 12(4): 327-346. doi:10.1057/mel.2010.11. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/227470407_A_methodology_to_assess_vessel_berthing_and_speed_optimization_policies
43. Al-Yakoob, S.M. (1997). *Mixed-integer mathematical programming optimization models and algorithms for an oil tanker routing and scheduling problem*. Tesis Doctoral. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia (Estados Unidos). 197 páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.11.2016] <https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-255314202974780/unrestricted/etd.pdf>
44. Alzaabi, S.A.J. y Diabat, A. (2016). *On the berth allocation problem*. RAIRO Operational Research 50(3): 491-501. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] <http://www.rairo-ro.org/articles/ro/pdf/2016/03/ro151066.pdf>
45. Ambrosino, D. y Sciomachen, A. (1998): *A constraints satisfaction approach for master bay plans*. Maritime Engineering and Ports. (Editado por Sciutto, G. y Brebbia, C.A.) WIT Press, Boston, pp: 155-164.
46. Ambrosino, D.; Sciomachen, A. y Tanfani, E. (2004). *Stowing a containership: the master bay plan problem*. Transportation Research, vol. 38(2): 81-99. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.09.002>
47. Ambrosino, D.; Sciomachen, A. y Tanfani, E. (2006). *A decomposition heuristics for the container ship stowage problem*. Journal of Heuristics, vol. 12(3): 211- 233. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] DOI: 10.1007/s10732-006-5905-1
48. Ambrosino, D. y Tanfani, E. (2009). *A discrete event simulation model for the analysis of critical factors in the expansion plan of a marine container terminal*. Proceedings 23rd European Conference on Modelling and Simulation ©ECMS. Editado por Javier Otamendi, Andrzej Bargiela, José Luis Montes y Luis Miguel Doncel Pedrera. ISBN: 978-0-9553018-8-9 / ISBN: 978-0-9553018-9-6 (CD) Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] http://www.scs-europe.net/conf/ecms2009/ecms2009%20CD/ecms2009%20accepted%20papers/lt_014_1_465a210a.pdf.
49. Ambrosino, D.; Anghinolfi, D.; Paolucci, M. y Sciomachen, A. (2010). *An Experimental Comparison of Different Heuristics for the Master Bay Plan Problem*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 6049, pp: 314-325.

50. An, L. (2012). *Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models*. Ecological Modelling, vol. 229(1): 25–36. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010>
51. Andersen, P.; Bak L.; Brandt, S.; Knudsen J.L.; Madsen, O.L.; Møller, K.J.; Nørgaard C. y Sandvad E. (n/a). [fecha de acceso 01.11.2016]. *The Mjølner BETA system*. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://daimi.au.dk/~beta/Papers/MBSoverview/MBSoverview.pdf>
52. Andersson, H.; Christiansen, M. y Fagerholt, A. (2010). *Transportation Planning and Inventory Management in the LNG Supply Chain*. Capítulo del libro Energy, Natural Resources and Environmental Economics. Parte de las series Energy Systems, pp: 427-439. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] DOI: [10.1007/978-3-642-12067-1_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12067-1_24)
53. Andersson, H.; Hoff, A.; Christiansen, M.; Hasle, G. y Lokketangen, A. (2008). *Industrial Aspects and Literature Survey: Combined Inventory Management and Routing*. SINTEF report A7056, ISBN 978-82-14-04399-0.
54. Andrews, S.; Murphy, F.H.; Wang, X.P. y Welch, S. (1996). *Modeling Crude Oil Lightering in Delaware Bay*. Interfaces, vol. 26(6): 68-78. DOI: 10.1287/inte.26.6.68 Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://www.courses.vcu.edu/MATH-jrm/OPER641/Papers/DESCrudeOilDelewareBay.pdf>
55. Angeloudis, P y Bell, M.G.H. (2009). *An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 46(3): 354–366. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.09.001>
56. Angeloudis, P. y Bell, M.G H. (2010). *Stack operation uncertainty in automated container terminals: Effects, challenges and control techniques*. IAME, 7–9 de Julio de 2010, Lisboa (Portugal).
57. Angeloudis, P. y Bell M.G.H. (2011). *A review of container terminal simulation models* Maritime Policy and Management, vol: 38(5): 523-540, ISSN: 0308-8839. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2011.597448>
58. ANYLOGIC (2016). *Multimethod Simulation Software: The only simulation tool that supports Discrete Event, Agent Based, and System Dynamics Simulation*. The Analogyc Company. San Petesburgo (Rusia). Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://www.anylogic.com/>

-
59. Arango, C.; Cortes, P.; Onieva, L.; y Escudero, A. (2013). *Simulation-Optimization Models for the Dynamic Berth Allocation Problem*. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 28(10): 769-779. Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016]. https://www.researchgate.net/publication/263415117_Simulation-Optimization_Models_for_the_Dynamic_Berth_Allocation_Problem
60. Arango, C.; Cortés, P.; Muñuzuri, J. y Onieva, L. (2011). *Berth allocation planning in Seville inland port by simulation and optimization*. Advanced Engineering Informatics, 25(3): 452-461. Disponible en [fecha de acceso 21.01.2017] https://io.us.es/componentes/P.Cortes/pdfs/BAP_CAP_final.pdf
61. Arango, C.; Cortés, P.; Onieva, L.; y Escudero A. (2012a). *Modelo de optimización y simulación para la gestión de muelles del puerto de Sevilla*. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización, Vigo (España), 18-20 de Julio de 2012, pp: 789-797. Disponible en [fecha de acceso 07.10.2016]. https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/18187/file_1.pdf?sequence=1
62. Arango, C.; Cortes, P.; Onieva, L.; y Escudero A. (2012b). *Modelo de optimización y simulación para la gestión de muelles del puerto de Algeciras*. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización, Vigo (España), 18-20 de Julio de 2012, pp: 798-805. Disponible en [fecha de acceso 07.10.2016]. https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/18188/file_1.pdf?sequence=1
63. ARENA (2014a). *Panama Canal Utilizes Port Simulation Software for Major Expansion*. Publicación ARENA-AP006A-EN-P-august 2014. Copyright © 2014 Rockwell Automation, 1201 Pegasus Park, Milwaukee (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.arenasimulation.com/resources/Panama_Port_Simulation.pdf
64. ARENA (2014b). *Paper Company Improves Shipping Efficiency with Logistics Simulation*. Publicación ARENA-AP020A-EN-P-august 2014. Copyright © 2014 Rockwell Automation, 1201 Pegasus Park, Milwaukee (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.arenasimulation.com/resources/Paper_company_logistics_simulation.pdf
65. ARENA (2014c). *Logistics Modeling Uncovers Impact of Changing Barge-Dock Operations*. Publicación ARENA-AP019A-EN-P-august 2014. Copyright © 2014 Rockwell Automation, 1201 Pegasus Park, Milwaukee (Estados Unidos). Disponible en

- [fecha de acceso 26.10.2016]
https://www.arenasimulation.com/resources/Logistics_simulation_modeling.pdf
66. ARENA (2016). *ARENA Port Terminal Simulation Software*. Rockwell Automation, 1201 Pegasus Park, Milwaukee (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017]
<https://www.arenasimulation.com/industry-solutions/port-terminal-simulation-software>.
 67. Artzner, P.; Delbaen, F.; Eber, J.-M. y Heath, D. (1997). *Thinking coherently*. RISK, vol. 10(11): 68-71.
 68. Artzner, P.; Delbaen, F.; Eber, J.-M. y Heath, D. (1998). *Coherent measures of risk*. Working Paper (no publicado). 24 páginas. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017]
<https://people.math.ethz.ch/~delbaen/ftp/preprints/CoherentMF.pdf>
 69. Ascape (2010). *Ascape Guide*. Ascape on Sourceforge. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://ascape.sourceforge.net/>
 70. ASCE (1984). *Erratum: Optimum Number and Capacity of Seaport Berths*” by Michihiko Noritake and Sakuo Kimura (August, 1983). Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 110(3): 359-360 Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1984\)110:3\(359.2\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:3(359.2))
 71. Ashar, A. y Ayzanoa, G. (1995). *Stock and Flow methodology for calculating capacity of cargo transfer terminals*. Conference on Transportation Management, Sate University of New York Maritime College (New York, Estados Unidos), pp: 1-11. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017]
<http://www.asafashar.com/Stock%20and%20Flow%20Methodology%20for%20Calculating%20Capacity%20of%20Cargo%20Transfer%20Terminal.pdf>
 72. Aslidis, T. (1989). *Combinatorial algorithms for stacking problems*. Ph.D. Tesis Doctoral Dirigida por Ernst G. Frankel. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering. MIT. (1989).
 73. Aslidis, T. (1990). *Minimizing of overstockage in containership operations*. Operational Research, vol. 90(1): 457-471.
 74. Asperen, E. van; Dekker, R.; Polman, M.T.H. y Swaan Arons, H. de (2003). *Modeling ship arrivals in ports*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. 7–10 de Diciembre 2003, Nueva Orleans (Estados Unidos). Editado por S. Chick, P.J. Sánchez, D. Ferrin y D.J. Morrice. pp: 1737–1744. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/4053670_Modeling_Ship_Arrivals_in_Ports

-
75. Auchincloss, A.H. y Diez Roux A.V. (2008). *A new tool for epidemiology: The usefulness of dynamic-agent models in understanding place effects on health*. American Journal of Epidemiology, vol. 168(1): 1–8. Disponible en [fecha de acceso 01.11.2016] <http://www.med.mcgill.ca/epidemiology/courses/EPIB654/Summer2010/Modeling/agent%20based%20simulation.pdf>
76. Averill, M.L y Larmey, C.S. (2002). *An Introduction to Simulation- Using SIMSCRIPT II.5*. Copyright © 1984, 2002 Averill M. Law and CACI, INC.-Federal. CACI Products Company. San Diego, California (Estados Unidos). 164 páginas. Disponible en [fecha de acceso 08.10.2016] http://www.caciasl.com/cust_center/ss3docs/SimscriptSimplified.pdf
77. Avriel, M. y Penn, M. (1993). *Exact and approximate solutions of the container ship stowage problem*. Computers and Industrial Engineering, vol. 25(1–4): 271–274. Disponible en [fecha de acceso 08.10.2016] [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(93\)90273-Z](https://doi.org/10.1016/0360-8352(93)90273-Z)
78. Avriel, M.; Penn, M.; Shpirer, N. y Witteboon, S. (1998). *Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts*. Annals of Operations Research vol. 76(1) : 55–71. Disponible en [fecha de acceso 08.10.2016] DOI: 10.1023/A:1018956823693
79. Avriel, M.; Penn, M. y Shpirer, N. (2000). *Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs*. Discrete Applied Mathematics, vol. 103(1–3): 271–279. Disponible en [fecha de acceso 08.10.2016] [https://doi.org/10.1016/S0166-218X\(99\)00245-0](https://doi.org/10.1016/S0166-218X(99)00245-0)
80. Awais, S.A. y Milants, J. (2009). *Agent based simulation for C-AGVs at Intermodal Terminal*. Master Thesis en Computer Science. School of Computing. Blekinge Institute of Technology - Soft Center, Ronneby (Suecia). 93 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:828294/FULLTEXT01.pdf>
81. Ayachi I.; Kammarti, R.; Ksouri, M. y Borne P. (2010). *A Genetic algorithm to solve the container storage space allocation problem*. International conference on Computational Intelligence and Vehicular System (CIVS) 4 páginas. Disponible en [fecha de acceso 08.11.2016] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.1051.pdf>
82. Aye, W.C.; Low, M.Y.H.; Ying, H.S.; Jing, H.W; Fan, L. y Min Z. (2010). *Visualization and Simulation Tool for Automated Stowage Plan Generation System*. Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists Vol II, IMECS 2012,

- 17-19 de Marzo de 2010, Hong Kong. Disponible en [fecha de acceso 24/06/2015] http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010_pp1013-1019.pdf
83. Aykagan, A. (2008). *Berth and quay crane scheduling: Problems, models and solution methods*. Tesis doctoral. Georgia Institute of Technology. Diciembre 2008. 185 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/26652/ak_aykagan_200812_phd.pdf
 84. Bae, H. Y.; Choe, R.; Park, T. y Ryu, K. R. (2011). *Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 22(3): 413-426. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] [doi:10.1007/s10845-009-0299-1](https://doi.org/10.1007/s10845-009-0299-1)
 85. Baillard, D.; Berger, C.; Haurie, A. y Loulou, R.(1985). *MARKAL-QUÉBEC: A Report on the Model and Data Base Improvements*. Groupe d'études et de recherche en analyse des decisions (GERAD) Discussion paper – G-85-23. 51 Páginas.
 86. Baillard, D.; Berger, C.; Haurie, A. y Loulou, R.(1987). *Modelling the Long Range Evolution of the Oil Refining Industry in Canada: The MARKAL Model Approach*. Groupe d'études et de recherche en analyse des decisions (GERAD) Discussion paper – G-87-04. 87 Páginas.
 87. Baird, A.J., (2006). *Optimising the container transshipment hub location in northern Europe*. Journal of Transport Geography, vol. 14(3): 195-214. Disponible en [fecha de acceso 03.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.12.004>
 88. Baker, P. y Canessa, M. (2009). *Warehouse design: A structured approach*. European Journal of Operational Research, vol. 193(2): 425–436. Disponible en [fecha de acceso 03.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.045>
 89. Baker, T. E. (1981). *Interactive Vessel Scheduling at Exxon*. Presentado en CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting, Toronto (Canada).
 90. Bakht, S.S. y Ahmad, Q.S. (2008). *A Multi Agent Web Based Simulation Model for Evaluating Container Terminal Management*. Master Thesis - Computer Science MCS 2088:33 (Agosto 2008) Blekinge Institute of Technology (Ronneby, Suecia). Disponible en [fecha de acceso 23.02.2017] http://www.academia.edu/4963840/A_Multi_Agent_Web_Based_Simulation_Model_for_Evaluating_Container_Terminal_Management
 91. Balakhontceva, M.; Karbovskii, V.; Rybokonenko, D. y BoReino Unidohanovsky, A. (2015). *Multi-agent Simulation of Passenger Evacuation Considering Ship Motions*.

- Procedia Computer Science, vol. 66(2015): 140-149. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.11.017>
92. Balanger, R. (1990). *MODSIM II. A modular, objet-oriented language*. Proceedings of the 22nd Winter Simulation Conference. IEEE Computer Society Washington, DC, Estados Unidos ©1991. Editado por O. Balci, R.P. Sadowski y R.E. Nance; pp:118-122 Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] http://informs-sim.org/wsc90papers/1990_0021.pdf
 93. Balanger, R. y Mullarney, A. (1990). *MODSIM II Tutorial*. CACI Productu Co. La Jolla California (Estados Unidos).
 94. Balanger, R.; Donovan B.; Morse, K y Rockower D. (1990). *MODSIM II Reference Manual*. CACI Productu Co. La Jolla, California (Estados Unidos).
 95. Balbi, S.; Giupponi, C.; Perez, P. y Alberti, M. (2013). *A Spatial Agent-Based Model for Assessing Strategies of Adaptation to Climate and Tourism Demand Changes in an Alpine Tourism Destination*. Environmental Modeling & Software vol. 45(1): 29–51. Disponible en [fecha de acceso 01.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.004>
 96. Balci, O.; Bertelrud, A.I. y Esterbrook C.M. (1998). *Visual Simulation Enviroment*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference (editado por D. J.Medeiros, E.Watson, J. Carson, y M. S. Manivannan. (1998). Disponible en [fecha de acceso 17.09.2016] <http://www.acm-sigsim-mskr.org/Courseware/Balci/Docs/VSEtutorial.pdf>
 97. Bandeira, D.L.; Becker, J.L. y Borestein, D. (2009). *A DSS for integrated distribution of empty and full containers*. Decision Support Systems vol. 47(2009): 383-397. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://fulltext.study/preview/pdf/552824.pdf>
 98. Banks, J. (1995). *Software Simulation*. Proceedings of the Winter Simulation Conference 1995. (ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W.R.Ligegdon y D. Goldsman), pp: 32- 38. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] http://www.informs-sim.org/wsc95papers/1995_0005.pdf
 99. Banks, J.; Carson J. y S y J. (1995). *Getting Started With GPSS/H*". Second Edition. Wolverine Software Corporation.
 100. Banks, J.; Carson, J.S.; Nelson, B.L. y Nicol, D.M. (2009). *Discrete-Event System Simulation*. (5th Edition) Prentice Hall (ISBN-13: 978-0-13-606212-7; ISBN-10: 0-13-606212-1).

101. Barraquand, J.; Langlois, B. y Latobe, J.-C. (1992). *Numerical potential filed techniques for robot path planning*. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 22(2): 224-241. Disponible en [fecha de acceso 08.05.2017] https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp_papers/1/BLL92.pdf
102. Barros, V.H.; Costa, T.S.; Oliveira, A. y Lorena, L.A.N. (2011). *Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints*. Computers & Industrial Engineering 60(4):606-613 (May 2011). DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.018. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220384641_Model_and_heuristic_for_berth_allocation_in_tidal_bulk_ports_with_stock_level_constraints
103. Baskett, F.; Chandy, K.M.; Munzt, R.R. y Palacios, F.G. (1975). *Open Closed, and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers*. Journal of the Association for Computing Machinery vol. 22(2): 248-260. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] <http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~cs266/sp10/readings/baskett75.pdf>
104. Bass, F.M. (1969). *A new product growth model for consumer durables*. Management Science, vol. 15(1969): 215-227. Doi: 10.1287/mnsc.15.5.215 Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.uvm.edu/~pdodds/teaching/courses/2009-08UVM-300/docs/others/everything/bass1969a.pdf>
105. Baunach, G.R.; Wibberley, E.S. y Wood B.R. (1985). *Simulation of a coal transshipment terminal: Batam Island, Indonesia*. Mathematics and Computers in Simulation 27 (2-3)(1985): 115–120. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/223632513_Simulation_of_a_coal_transshipment_terminal_Batam_Island_Indonesia
106. Bausch, D. O., Brown, G. G., y Ronen, D. (1991). *Elastic Set partitioning – A Powerful Tool for Scheduling Transportation of Oil and Gas*. Proceedings of the Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry, 13-14 de Junio de 1991, Montreal (Canadá). Editores M. Breton y G. Zaccour. Editions Technip, Paris, (Francia), pp :151-162. ISBN : 9782710806103. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <http://www.editionstechnip.com/fr/catalogue-detail/60/advances-in-operations-research-in-the-oil-and-gas-industry.html>
107. Bausch, D. O., Brown, G. G., y Ronen, D. (1998). *Scheduling short-term marine transport of bulk products*. Maritime Policy & Management vol. 25(1):335-348. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] DOI: 10.1080/03088839800000057

-
108. Beattie, C.J.; Brown, A.P. y Norris, M.E. (1970). *Planning deep-water ports*. Management Decision, vol. 4(4): 55 – 61. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] DOI: [10.1057/jors.1971.9](https://doi.org/10.1057/jors.1971.9)
109. Beattie, C.J.; Brown, A.P. y Norris, M.E. (1971). *Planning deep-water ports*. Journal of Operational Research Society 22(1): 63–75. DOI: 10.1057/jors.1971.9. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/32033365_Planning_Deep-Water_Ports y <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/eb000951>
110. Beaverstock, M.; Greenwood, A.; Lavery, E. y Nordgren, W. (2011). *Applied Simulation Modeling and Analysis using FlexSim*. 2nd edition. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). 438 páginas. ISBN: 0983231915.
111. Béchar, V. y Côté, N. (2013). *Simulation of mixed discrete and continuous systems: An iron ore terminal example*. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (editado por R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, y M. E. Kuhl) pp: 1167-1178. Disponible en [fecha de acceso 07/07/2015] <http://informatics-sim.org/wsc13papers/includes/files/102.pdf>
112. Bedau, M.A. (2003). *Artificial life: Organization, adaptation, and complexity from the bottom up*. Trends in Cognitive Science, vol. 7(11): 505–512. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://people.reed.edu/~mab/publications/papers/BedauTICS03.pdf>
113. Behdani, B. (2012). *Evaluation of Paradigms for Modeling Supply Chains as Complex Socio-Technical Systems*. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (editado por C. Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, and A.M. Uhrmacher). Disponible en (fecha de acceso 15.10.2016) en https://www.academia.edu/1523272/Evaluation_of_Paradigms_for_Modeling_Supply_Chains_as_Complex_Socio-Technical_Systems
114. Bellmore, M.; Bennington, G. y Lubore, S. (1968). *A Maximum Utility Solution to a Vehicle Constrained Tanker Scheduling Problem*. The Mitre Corporation. Report MRT - 319 (24 páginas). También presentado en Naval Research Logistics Quarterly, 15(3): 403-411. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=AD0684708>
115. Bellmore, M.; Bennington, G., y Lubore, S. (1971). *A Multi-Vehicle Tanker Scheduling Problem*. Transportation Science, vol. 5(1): 36-47. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.5.1.36>

-
116. Benmerikhi, M. (2013). *Future ports to benefit from Intelligent Autonomous Technology*. World Port Development - International Journal for Port Management., April 2013 CI Media Ltd. (Maidenhead, Berkshire, Inglaterra). Disponible en [fecha de acceso 10.05.2017] [/www.intrade-nwe.eu/ images/lespdf/world-port-development-04-2013.pdf](http://www.intrade-nwe.eu/images/lespdf/world-port-development-04-2013.pdf)
117. Benoist, T.; Gardiz, F.; Megelx, R.; Pajean, C.; Belgacem, M.B.; Leblanc, D. ; Legrandy, F. y Pietrasz, S. (2016):. *Designing and optimizing an LNG supply chain using LocalSolver*. Remitido para revisión a sciencesconf.org:verolog2016:98628. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <https://verolog2016.sciencesconf.org/98628/document>
118. Berg-Andreassen, J. A, y Prokopowicz, A. K. (1992). *Conflict of interest in deep-draft anchorage usage-applications of QT*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 118(1): 632-641. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1992\)118:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:1(75))
119. Berger, C. (1985). *La modélisation des raffineries dans MARKAL-Québec*. Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (GERAD) Discussion paper – G-85-26. 139 Páginas.
120. Bernhardt, K.L.S. (2013). *Agent-based modeling in transportation*. 70 Transportation Research Circular E-C113: Artificial Intelligence in Transportation, pp: 72–80. Disponible en [fecha de acceso 15.10.2016] <https://www.nap.edu/read/23208/chapter/11#82>
121. Beškovnik, B. y Twrdy, E. (2011). *Managing maritime automobile terminals: an approach toward decision-support model for higher productivity*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 3(4): 233–241. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0067>
122. Bhasi (2004). *Ship Unloading-A Simulation Based Model for Scheduling of Barges for Ship Lightering*. Bulk Solids Handling 24(4): 248-251. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/261179543_Ship_Unloading-A_Simulation_Based_Model_for_Scheduling_of_Barges_for_Ship_Lightering
123. Bhasi. M. y Acharya, D. (1997). *Optimization of barge mix for ship lightering operations*. Bulk Solids Handling 17(2): 219-226. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/261179542_Optimization_of_barge_mix_for_ship_lightering_operations

-
124. Bichou, H. ; Bell, M. y Evans, A. (2013). *Risk Management in Port Operations, Logistics and Supply Chain Security*. Lloyds Practical Shipping Guides. Ed. Taylor and Francis, 412 páginas. ISBN: 9781317912880.
125. Bielli, M.; Boulmakoul, A. y Rida M. (2006). *Object oriented model for container terminal distributed simulation*. European Journal of Operational Research vol.175(2006): 1731–1751. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://202.114.89.60/resource/pdf/1871.pdf>
126. Bierwirth, C. y Meisel, F. (2009). *A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints*. Journal of Scheduling vol.12(4): 345-360. DOI: 10.1007/s10951-009-0105-0 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/220366369_A_fast_heuristic_for_quay_crane_scheduling_with_interference_constraints
127. Bierwirth, C. y Meisel, F. (2010). *A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminal*. European Journal of Operational Research, vol. 202(3): 615-627. DOI:10.1016/j.ejor.2009.05.031. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://fulltext.study/preview/pdf/481147.pdf>
128. Bierwirth, C. y Meisel, F. (2015). *A Follow-up Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals*. European Journal of Operational Research, vol. 244(3): 675-689. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714010480?np=y&npKey=d1a90a0026d28d962b4b7752cbb4557e3f1e2472acaedf09060dbf629d16f80>
129. Bin, L.; Li, W.-F. y Yu, Z. (2008). *Agent-based modeling and simulation for vehicle dispatching at container terminals*. Journal of System Simulation, vol. 20 (2008): 5158-5161. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/291916353_Agent-based_modeling_and_simulation_for_vehicle_dispatching_at_container_terminals
130. Bin, L.; Li, W.-F. y Yu, Z. (2009). *Study on Modeling of Container Terminal Logistics System Using Agent-Based Computing and Knowledge Discovery*. International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 5(1): 36-36. Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 1550-1329 Print/1550-1477 DOI: 10.1080/15501320802524029. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2009/251681/abs/>
131. Binkowski, M. y McCarragher, B. (1999). *A queueing model for the design and analysis of a mining stockyard*. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application, vol.

- 9(1): 75-98. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1023/A:1008397332376](https://doi.org/10.1023/A:1008397332376)
132. Birge, J.R. (1982). *The value of stochastic solution in stochastic linear programs with fixed resource*. Mathematical Programming 24 (1982). Páginas 314-325. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/47912/10107_2005_Article_B_F01585113.pdf?sequence=1
 133. Birtwistle, G.M.; Dahl, O. J.; Myhrhaug B. y Nygaard K. (1973). *SIMULA Begin*. Philadelphia. Auerback Publishers Inc. Consultado en revisión de Birtwistle, G.M (1979). Editado por Van Nostrand Reinhold (5 de junio 1979). 480 páginas ISBN-10: 0884050327 / ISBN-13: 978-0884050322.
 134. Birtwistle, G. M. (1979). *DEMOS: A system for discrete event simulation on Simula*. London: McMillan. Consultado en School of Computer Science, University of Sheffield, G. Birtwistle. 238 páginas. Disponible en [fecha de acceso 19.10.2016] <http://staffwww.dcs.shef.ac.Reino Unido/people/G.Birtwistle/research/demos.pdf>
 135. Bischoff, E.E. y Marriot, M.D. (1990). *A Comparative Evaluation of Heuristics for Container Loading*. European Journal of Operational Research, vol. 44(2): 267-276. Disponible en [fecha de acceso 19.10.2016] [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90362-F](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90362-F)
 136. Bischoff, E.E. y Ratcliff, M.S.W. (1995). *Issues in the Development of Approaches to Container Loading*. Omega, vol, 23(4): 377-390. Disponible en [fecha de acceso 19.10.2016] [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(95\)00015-G](https://doi.org/10.1016/0305-0483(95)00015-G)
 137. Bischoff, E.E.; Janetz, F. y Ratcliff, M.S.W. (1995). *Loading Pallets with Nonidentical Items*. European Journal of Operational Research, vol. 84(3): 681-692. Disponible en [fecha de acceso 19.10.2016] [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00031-K](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00031-K)
 138. Bischoff, E.E. (2006). *Three dimensional packing of items with limited load bearing strength*. European Journal of Operational Research, vol. 168(3): 952-966. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.037>
 139. Bish, E.K.; Leong T.Y.; Li C.L.; Ng J.W.C. y Simchi-Levi D. (2001). *Analysis of a new vehicle scheduling and location problem*. Naval Research Logistics vol.48(5): 363-385. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] DOI: [10.1002/nav.1024](https://doi.org/10.1002/nav.1024)
 140. Bish, E.K. (2003). *A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal*. European Journal of Operational Research vol.144(1): 83-107.

- (2003). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 12.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/222283033_A_multiple-crane-constrained_scheduling_problem_in_a_container_terminal
141. Bish, E.K.; Chen, F.Y.; Leong, Y.T.; Nelson, B.L.; Ng, J.W.C. y Simchi-Levi, D. (2005). *Dispatching vehicles in a mega container terminal*. OR Spectrum, vol. 27(4): 491-506. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/226773582_Dispatching_vehicles_in_a_mega_container_terminal
142. Bittantea, A.; Jokinen, R.; Pettersson, F. y Saxén, H. (2015). *Optimization of LNG Chain*. Computer Aided Chemical Engineering, vol. 37(2015): 779–784 (12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2016]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044463578501250>
143. Bjørstad, H. y Haugland, D. (1991). *A stochastic model for gasoline blending*. Proceedings of the Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry, 13-14 de Junio de 1991, Montreal (Canada). Editores: M. Breton y G. Zaccour. Ediciones Technip, Paris, (Francia), pp: 21-32. ISBN : 9782710806103. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2016] <http://www.editionstechnip.com/fr/catalogue-detail/60/advances-in-operations-research-in-the-oil-and-gas-industry.html>
144. Bobillier, P. A.; Kahan, B. C. y Probst, A. R. (1976). *Simulation with GPSS and GPSS V*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. (1^a edición 1 de noviembre de 1976). 495 páginas. ISBN-10: 0138105499 / ISBN-13: 978-0138105495.
145. Boer, C. A. y Saanen, Y. (2008). *Controls: Emulation to improve the performance of container terminals*. Proceedings of the 40th Winter Simulation. Winter Simulation Conference, 7–10 de diciembre de 2008, Miami (Estados Unidos). (Editado por S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler). Disponible en [fecha de acceso 12.03.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc08papers/332.pdf>
146. Bonini, C. P. (1963). *Simulation in information and decision systems in the firm*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. (Ford Foundation doctoral dissertation series) 178 páginas ISBN: 9781258233969
147. Bontempi, G.; Gambardella, L.M. y Rizzoli, A.E. (1997). *Simulation and optimisation for management of intermodal terminals*. Proceedings of the European Simulation Conference - ESM'97, 1-4 de Junio de 1997, Estambul (Turquía). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]

https://www.researchgate.net/publication/2887472_Simulation_And_Optimisation_For_Management_Of

148. Bookstaber, R. (2012). *Using agent-based models for analyzing threats to financial stability*. Working Paper nº 3 (21 diciembre 2012). Office of Financial Research - U.S. Department Treasury. Washington, D.C. (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 12.03.2017] https://www.treasury.gov/initiatives/ofr/research/Documents/OFR_Working_Paper_No_3_ABM_Bookstaber_Final.pdf
149. Born, R. y Ståhl, I. (2004). *WebGPSS: The first two hours of simulation education*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference vol. 2(2004): 2066–2074. Editado por R. G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, y B. A. Peters. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc04papers/277.pdf>
150. Born, R. y Ståhl, I. (2008). *A business course in simulation modeling*. Issues in Information Systems, vol. IX(1) : 6-15. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] http://iacis.org/iis/2008/S2008_887.pdf
151. Borovits, I. y Ein-dor, P. (1975). *Computer simulation of a seaport container terminal*. Simulation, vol. 25(2): 141–144. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/003754977502500204>
152. Borshchev, A. y Filippov, A. (2004). *From System Dynamics and Discrete Event to practical Agent Based Modelling: Reasons, Techniques, Tools*. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Oxford (Inglaterra). Disponible en [fecha de acceso 22.10.2016] <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/systemdyndiscreteeventabmcompared.borshchevfilippov04.pdf> y http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004/PAPERS/381BORSH.pdf
153. Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America: Lisle, Illinois (Estados Unidos). 614 páginas. ISBN: 978-0-9895731-7-7 Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://www.anylogic.com/big-book-of-simulation-modeling>
154. Bortfeldt, A. y Gehring, H. (1998). *Ein Tabu Search-Verfahren für Containerbeladeprobleme mit schwach heterogenem Kistenvorrat*. Operations Research Spektrum, vol. 20(2): 237–250. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017]

- https://www.researchgate.net/publication/251338363_Ein_Tabu_Search-Verfahren_fur_Containerbeladeprobleme_mit_schwach_heterogenem_Kistenvorrat
155. Bortfeldt, A. y Gehring, H. (2001). *A Hybrid Genetic Algorithm for the Container Loading Problem*. European Journal of Operational Research vol. 131(1): 143–161. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/223079635_Hybrid_genetic_algorithm_for_the_container_loading_problem
156. Bortfeldt, A.; Gehring, H. y Mack, D. (2003). *A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem*. Parallel Computing, vol. 29(5): 641–662. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222406193_A_parallel_tabu_search_algorithm_for_solving_the_container_loading_problem
157. Bortfeldt, A. y Wäscher, G. (2012). *Container loading problem – A state-of-the-art review*. Working Paper n°7/2012. Faculty of Economics and Management. Otto Van Guericke Universität Magdeburg. 47 páginas. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] http://www.fww.ovgu.de/fww_media/femm/femm_2012/2012_07-EGOTEC-503ec3895182dc0d922a6bd7feebb3a5.pdf
158. Bortfeldt, A. y Wäscher, G. (2013). *Constraints in container loading – A state-of-the-art review*. European Journal of Operational Research, vol. 229(1): 1–20. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171200937X>
159. Borůvka, O. (1926). *Príspevek k řešení otázky ekonomické stavby elektrovodních sítí (Contribution to the solution of a problem of economical construction of electrical networks)*. Elektronický Obzor (en Checoslovaco) vol. 15(1): 153–154.
160. Boschert, S. y Hellmuth, T. (2010). *Simulation in bulk material handling*. Proceedings of the Bulk Solids Europe Conference, 9-10 de septiembre de 2010, Escocia.
161. Böse, J.W.; Reiners, T.; Steenken, D. y Vos S. (2000). *Vehicle dispatching at seaport container terminals using evolutionary algorithms*. Proceedings of the 33rd International Annual Conference on System Sciences, DTM-IT, pp: 1– 10. IEEE, Piscataway, (Hawai, Estados, Unidos). Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/2817767_Vehicle_Dispatching_at_Seaport_Container_Terminals_Using_Evolutionary_Algorithms

-
162. Böse, F. y Lampe, W. (2005) *Adoption of RFID in Logistics*. Proceedings of the 5th International Business Information Management Association Conference (IBIMA'2005): The internet & Information in Modern Organizations, 13-15 de diciembre de 2005, Cairo (Egipto).
163. Böse, F.; Piotrowski, J. y Windt, K (2005). *Selbststeuerung in der Automobil-Logistik*. *Industriemanagement*, vol. 20(4): 37-40. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] http://www.sfb637.uni-bremen.de/fileadmin/SFB_Files/PDF_Download/SFB637-A1-Ia-05-01.pdf
164. Böse, F. y Windt, K., (2007). *Autonomously Controlled Storage Allocation on an Automobile Terminal*. Understanding autonomous cooperation and control in logistics, Berlin: Springer- Verlag, pp: 351-363 (Editado por M. Hülsmann y K. Windt,). Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] <http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-A1-07-032-IA.pdf>
165. Böse, J.W. (2011). *Handbook of Terminal Planning*. Springer (editado el 09/03/2011) 433 páginas. ISBN-10: 1441984070, ISBN-13: 978-1441984074.
166. Botter, R.C. y Brinati, M. A. (1991). *Stowage Container Planning: a model for getting optimal solution*. International Conference of Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design, Rio de Janeiro, pp: 217-229.
167. Botti, V. (2004). *Multi-Agent System Technology in a Port Container Terminal Automation*. European Research Consortium for Informatics and Mathematics (ERCIM), vol. 56(2004): 37-39. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] http://www.ercim.eu/publication/Ercim_News/enw56/botti.html
168. Boulougouris, E.K. y Papanikolaou, A. (2002). *Modelling and Simulation of the evacuation process of passenger ships*. Proceedings of the 10th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2002). Creta (Grecia), pp: 1-5 (Editor: S.A. Mavrakos & K.J. Spyrou). Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] http://old.naval.ntua.gr/sdl/Publications/Proceedings/IMAM2002_Proceed57.pdf
169. Boxall, P.; Gwynne, S.; Filippidis, L.; Galea, E.R. y Cooney, D. (2005). *Advanced Evacuation Simulation Software and its use in Warships*. Proceedings of the Human Factors in Ship Design, Safety and Operation, pp: 49-56., 23-24 de Feb 2005 Londres (Reino Unido), Publicado por The Royal Institute of Naval Architects. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>

170. BP Statistical Review (2016). *BP Statistical Review of World Energy June 2016*. BP Statistical Review of World Energy. BP p.l.c. (1 St James's Square, London SW1Y 4PD, Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
171. Brailsford, S. y Hilton, N. (2001). *A comparison of discrete event simulation and system dynamics for modelling health care systems*. Texto de Planning for the Future: Health Service Quality and Emergency Accessibility. Operational Research Applied to Health Services (ORAHs). Editor Riley, J., editor. Glasgow Caledonian University (2001). Disponible en [fecha de acceso 04.11.2016] <https://core.ac.Reino Unido/download/files/34/30381.pdf>.
172. Brailsford, S.; Desai, S. y Viana, J. (2010). *Towards the holy grail: Combining system dynamics and discrete-event simulation in healthcare*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, y E. Yücesan, pp: 2293-2303. Disponible en [fecha de acceso 01.05.2017] http://eprints.soton.ac.Reino Unido/206555/1/Brailsford_Desai_and_Viana.pdf
173. Brailsford, S. (2012). *Discrete-event simulation is alive and kicking*. Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop 2012 (SW12). Disponible en (fecha de acceso 05/06/2015) <http://www.theorsociety.com/Pages/ImagesAndDocuments/documents/Conferences/SW12/Papers/Brailsford.pdf>
174. Brandt, S. y Madsen, O.L. (2016). *Object-Oriented Distributed Programming in BETA – Abstract*. Computer Science Department, Aarhus University. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] en <http://daimi.au.dk/~beta/Papers/OODP/oodp.abstract.html>
175. Brant, E. (1961). *Discussion of Prediction of Maximum Practical Berth Occupancy by Thomas J. Fratar*. Alvin S. Goodman and Austin. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1961, vol. 126(4): 642-642.
176. Bray, R.L. y Mendelson, H. (2012). *Information transmission and the bullwhip effect: An empirical investigation*. Management Science vol. 58(5): 860-875. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.1110.1467?journalCode=mnsc>
177. Breitenecker, F.; Bicher, M. y Wurzer, G. (2015). *Agent-Based Simulation in Archaeology: A Characterization*. Incluido en: *Agent-based Modeling and Simulation in Archaeology*, pp: 53-76 Springer: New York. 978 ISBN -3-319-00007-7. 269 Páginas.

- Disponible en [fecha de acceso 01.11.2016]
<http://www.springer.com/cn/book/9783319000077>
178. Bremer, W.M. y Perakis, A.N.(1992). *An operational tanker scheduling optimization system: model implementation, results and possible extensions*. Maritime Policy & Management, vol. 19(3): 189–199. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] DOI: [10.1080/751248660](https://doi.org/10.1080/751248660)
 179. Brent, R. P. (1973). *Algorithms for Minimization without Derivatives*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 224 páginas. ISBN-10: 0130223352 / ISBN-13: 978-0130223357.
 180. Breton, M, y El-Hachem S. (1991). *Application of stochastic programming to medium and long term planning in the refining industry*. Proceedings of the Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry, 13-14 de Junio de 1991, Montreal (Canada). Editores: M. Breton y G. Zaccour. EdicionesTechnip, Paris, (Francia), pp: 1-20. ISBN: 9782710806103. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2016] <http://www.editionstechnip.com/fr/catalogue-detail/60/advances-in-operations-research-in-the-oil-and-gas-industry.html>
 181. Briano, E.; Caballini, C.; Mosca, M. y Revetria, R. (2008). *Modelling of Voltri Terminal Europe in Genoa Using System Dynamic Model Simulation*. Proceedings of the 7th System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE'08), 21-23 de Noviembre de 2008, Venecia (Italia), pp: 411-417. ISBN: 978-960-474-027-7. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) https://www.researchgate.net/publication/261857932_Modelling_of_Voltri_terminal_Europe_in_Genoa_using_system_dynamic_model_simulation
 182. Briano, E.; Caballini, C.; Mosca, M. y Revetria, R. (2009). *A system dynamics decision cockpit for a container terminal: The case of Voltri Terminal Europe*. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, vol. 3(2): 55-64. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://www.naun.org/main/NAUN/mcs/mcs-108.pdf>
 183. Bridi, I.; Alvarenga, R., Cezana, T. y Matos, G. (2016). *Mathematical model for the Berth Allocation Problem in ports with cargo operation limitations along the pier*. Gestão & Produção, vol. 23(4): 1-16 páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x2266-15>
 184. Briskin, L. E. (1966). *Selecting Delivery Dates in the Tanker Scheduling Problem*. Management Science, vol. 12(6): 224-233. Disponible en [fecha último acceso el 14.11.2016] <http://www.jstor.org/stable/2628121>

-
185. Briskorn, A.; Drexl, A. y Hartmann, S. (2006). *Inventory-based dispatching of automated guided vehicles on container terminals*. OR Spectrum, vol. 28(4): 611–630. Disponible en [fecha último acceso el 14.11.2016] DOI: [10.1007/s00291-006-0033-8](https://doi.org/10.1007/s00291-006-0033-8)
186. Brockmeyer, E.; Halstrøm, H.L.; Erlang, A.K. y Jensen A. (1948). *The life and works of A.K. Erlang*. The Copenhagen Telephone Company. Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences. Copenague (Dinamicarca). 275 Páginas.
187. Brooks, M. (1990). *Ocean Carrier Selection Criteria in a New Environment*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, vol. 26(4): 339-355. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/267038620_Ocean_Carrier_Selection_Criteria_in_a_New_Environment
188. Brooks, R.A. (1982). *Solving the find-path problem by good representation of free space*. Proceedings of the 2nd National Conference on Artificial Intelligence (pp: 381-386), Pittsburgh (Pensilvania, Estados Unidos). ISBN 978-1-57735-192-4 (456 páginas) Disponible en [fecha de acceso 08.05.2017] <http://www.aaai.org/Papers/AAAI/1982/AAAI82-091.pdf>
189. Brooks, R.A. (1983) *Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space*. Robotics and Automation, vol. 13(2): 190-197. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: [10.1109/TSMC.1983.6313112](https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313112)
190. Brooks, R.A. (1984). *Aspects of mobile robot visual map making*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics Research. 20-23 Agosto de 1984, Kyoto (Japón).
191. Brooks, R.A. (1985). *Aspects of mobile robot visual map making*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2(1985): 824 - 829 Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: [10.1109/ROBOT.1985.1087348](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1985.1087348).
192. Brooks, R.A. (1986). *A robust layered Control System for a Mobile Robot*. Journal of Robotics and Automatation, vol. 2(1): 14-23. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <http://www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/lari/papers/Brooks86RobustLayeredControl.pdf>
193. Brooks, M. (1995). *Understanding the ocean container market—a seven country study [1]*. Maritime Policy & Management vol. 22(1): 39-49. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] DOI: [10.1080/03088839500000031](https://doi.org/10.1080/03088839500000031)

-
194. Brouer, B.D.; Pisinger, D. y Spoorendonk, S. (2011). *Liner Shipping Cargo Allocation with Repositioning of Empty Containers*. Information Systems and Operational Research (INFOR'2011), vol. 49(2): 109-124. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] DOI: [10.3138/infor.49.2.109](https://doi.org/10.3138/infor.49.2.109)
195. Brown, G. G.; Cormican, K. J.; Lawphongpanich, S. y Widdis, D. (1997). *Optimizing submarine berthing with a persistence incentive*. Naval Research Logistics, 44(4): 301-318. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6750\(199706\)44:4<301::AID-NAV2>3.0.CO;2-A](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1520-6750(199706)44:4<301::AID-NAV2>3.0.CO;2-A)
196. Brown, G. G.; Graves, G. W. y Ronen, D. (1987). *Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil*. Management Science, vol. 33(3): 335-346. DOI: 10.1287/mnsc.33.3.335. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/227445852_Scheduling_Ocean_Transportation_of_Crude_Oil.
197. Brown, J.F. (1967). *Comments on a Paper by A. Novaes and E. Frankel "A Queuing Model for Unitized Cargo Generation"*. Operations Research, vol. 15(3): 572-575. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/opre.15.3.572>
198. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012a). *IMO Information paper - response time data for large passenger ferries and cruise ships*. SAFEGUARD Passenger Evacuation Seminar. 30 de Noviembre 2012, Londres, (Reiuno Unido), pp: 92-96, ISBN 978-1-909024-08-3, 2012. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
199. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012b). *IMO INF paper summary - response time data for large passenger ferries and cruise ships*. S AFEGUARD Passenger Evacuation Seminar. 30 de Noviembre 2012, Londres, (Reiuno Unido),pp: 91, ISBN 978-1-909024-08-3. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
200. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012c). *Passenger response time datasets for large passenger ferries and cruise ships derived from sea trials and recommendations to IMO to update MSC circ 1238*. SAFEGUARD Passenger Evacuation Seminar. 30 de Noviembre 2012, Londres, (Reiuno Unido), pp: 25-40, ISBN 978-1-909024-08-3. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>

-
201. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012d). *Response time data for large passenger ferries and cruise ships*. Proceedings of the 5th International Symposium, Human Behaviour in Fire, Cambridge (Reino Unido), 19-21 September 2012, Interscience Communications Ltd. Pp: 460-471. ISBN 978-0-9556548-8-6, 2012. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
202. Brown, R.; Galea, E.R.; Deere, S., y Filippidis, L. (2013). *Passenger Response Time Data-Sets for Large Passenger Ferries and Cruise Ships Derived from Sea Trials*. The Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, International Journal of Maritime Engineering, ISSN 1470-8751, vol. 155, Part A1, pp: 33-47.
203. Brumley, A. y Koss, L. (2000). *The influence of human factor on the motor ability of passengers during evacuation of ferries and cruise ships*. Conference on Human Factors in ship Design and Operations, Londres (Reino Unido). Editado por The Royal Institute of Naval Architects.
204. Bruno, G.; Ghiani, G. e Improta, G. (2000). *Dynamic positioning of idle automated guided vehicles*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 11(2): 209-215. doi:10.1023/A:1008947018074. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1008947018074>
205. Bruzzone, A. y Signorile, R. (1998). *Simulation and genetic algorithms for ship planning and shipyard layout*. SIMULATION, vol. 71(2): 74-83. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220164632_Simulation_and_Genetic_Algorithms_for_Ship_Planning_and_Shipyard_Layout
206. Bruzzone, A.; Giribone, P. y Revetria, R. (1999). *Operative requirements and advances for the new generation simulator in multimodal container terminal*. Proceedings of the 31st Winter Simulation Conference. Phoenix, Arizona (Estados Unidos) vol. 2(1999): 1243-1252. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] [doi>10.1145/324898.325049](https://doi.org/10.1145/324898.325049).
207. Bryan, O.F. Jr. (1989). *MODSIM II—an object oriented simulation language for sequential and parallel processors*. Proceedings of the 21st Winter Simulation Conference, pp: 172-177. ACM New York, NY, Estados Unidos ©1989. ISBN: 0-911801-58-8 / Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] [doi>10.1145/76738.76758](https://doi.org/10.1145/76738.76758)
208. Buchheit, M.; Kuhn, N.; Müller, J.P. y Pischel, M. (1992). *MARS: Modeling a Multiagent scenario for shipping companies*. Proceedings of the European Simulation Symposium (ESS-92), Society for Computer Simulation (SCS), Dresden (Alemania) (1992), pp: 302-306.

209. Budipriyanto, A; Wirjodirdjo, B.; Pujawan, N. y Gurning, S. (2015). *Berth allocation problem under uncertainty: A conceptual model using collaborative approach*. Procedia Manufacturing, vol. 4 (2015): 429 – 437 (Industrial Engineering and Service Science 2015, IESS 2015). Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] http://ac.els-cdn.com/S2351978915011750/1-s2.0-S2351978915011750-main.pdf?_tid=b836f528-e63d-11e6-a92d-00000aab0f02&acdnat=1485706524_91175cea69613907a5a2d4b2f58aae8c
210. Buffa, S.E.; Armout, G.C. y Vollmann, T.E. (1964). *Allocating Facilities with CRAFT*. Harvard Business Review, March-April 1964, 136 páginas.
211. Bugaric, U. y Petrovic, D. (2002). *Modeling and Simulation of Specialized River Terminals for Bulk Cargo Unloading with Modeling of the Elementary Sub-Systems*. Systems Analysis Modelling Simulation, vol. 42(10): 1455-1482. DOI: 10.1080/713745639. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/233025626_Modeling_and_Simulation_of_Specialized_River_Terminals_for_Bulk_Cargo_Unloading_with_Modeling_of_the_Elementary_Sub-Systems
212. Bugaric, U. y Petrovic, D. (2007). *Increasing the capacity of terminal for bulk cargo unloading*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 15(10): 1366-1381. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X07001165>
213. Bugaric, U.; Petrovic, D.; Petrovic, Z.; Pajcin, M. y Markovic-Petrovic, G. (2011). *Determining the Capacity of Unloading Bulk Cargo Terminal Using Queuing Theory*. Journal of Mechanical Engineering, vol. 57(5): 405-416. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] http://www.sv-jme.eu/data/upload/2011/05/05_2009_084_Bugaric_05.pdf
214. Bugaric, U.; Petrovic, D.B.; Jeli, Z.V. y Petrovic, D.V. (2012). *Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading*. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, vol. 88(12): 1508-1521. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/258188085_Optimal_utilization_of_the_terminal_for_bulk_cargo_unloading
215. Buhrkal, K.; Zuglian, S.; Ropke, S.; Larsen, J., y Lusby, R. (2011). *Models for the discrete berth allocation problem: a computational comparison*. Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review, vol. 47(4): 461-473. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2010.11.016>

-
216. Burge J.E. (1998). *Knowledge Elicitation Tool Classification*. Master Thesis. Computer Science Department. Artificial Intelligence Research Group. Worcester Polytechnic Institute, Worcester (Massachusetts, Estados Unidos) http://web.cs.wpi.edu/~jburge/thesis/kematrix.html#_Toc417957397
217. Burnett, G.A.; Finke, D. A.; Medeiros, D. J. y Traband, M.T. (2008). *Automating the development of shipyard manufacturing models*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (Editado por S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, J. W. Fowler), pp: 1761-1767. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/221528457_Automating_the_development_of_Shipyard_manufacturing_models
218. Buxton, I.L. y Akgul, B.U. (1989). *The comparison of general cargo ship economic performance by simulation*. Maritime Policy & Management, vol. 16(1): 27-44. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03088838900000021>
219. Caballini, C.; Sacone, S. y Siri, S. (2012). *The port as a system of systems: a System Dynamics simulation approach*. 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 2012, pp: 411-417. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] DOI: [10.1109/SYSoSE.2012.6384155](https://doi.org/10.1109/SYSoSE.2012.6384155)
220. Cáceres, R.; Mendoza, H.; Tuñón, G.; Rabelo, L.C. y Pastrana J. (2015). *Modeling and Simulation of Berthing Processes for a Panamanian Container Terminal using BPMN and Discrete Event Simulation*. Proceedings of the 2015 International Conference on Operations Excellence and Service Engineering. 10-11 de Septiembre de 2015, Orlando, Florida (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] http://ieomsociety.org/IEOM_Orlando_2015/papers/259.pdf
221. CACI (1988). *SIMSCRIPT II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] http://www.caciasl.com/cust_center/ss3docs/simprog.pdf
222. CACI (1990). *SIMFACTORY II-5. User's Manual*. CACI Products Co. La Jolla (California, Estados Unidos).
223. CACI (1991a). *A quick look at NETWORK II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, Estados Unidos).
224. CACI (1991b). *A quick look at LANNET II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, Estados Unidos).

-
225. CACI (1991c). *A quick look at COMNET II-5. Programming Language*. CACI Products Co. La Jolla (California, Estados Unidos).
226. CACI (1996). *MODSIM III: The language for object-oriented programming*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (Estados Unidos).
227. CACI (2007). *SIMSCRIPT III© – Users Manual*. Copyright © 1984, 2002 Averill M. Law and CACI, INC.-Federal. CACI Products Company. San Diego, California (Estados Unidos). 160 páginas. Disponible en [fecha de acceso 08.11.2016] http://www.simscrip.com/cust_center/sim3r2docs/SIMSCRIPTIII_User_Manual.pdf
228. CACI (2011a). *History of SIMSCRIPT*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 12.11.2016] <http://www.simscrip.com/partners/partners.html>
229. CACI (2011b). *SIMSCRIPT III: Object-Oriented, Modular, Integrated software development tool*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 12.11.2016] <http://www.simscrip.com/products/products.html>.
230. Caldeira-Saraiva, F.; Gyngell, F.J. Wheeler, R.; Galea, E.R.; Carran, A.; Skjong, R.; Vanem, E.; Johansson, K.; Rutherford, B. y Simoes, A.J. (2004). *Simulation of ship evacuation and passenger circulation*. Proceedings of the 2nd International Maritime Safety Conference on Design for Safety, Sakai (Japón), Publicado por Ship and Ocean Foundation, 27-30 de Octubre de 2004, pp: 197-205. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
231. Cannella S. y Ciancimino, E. (2010). *On the bullwhip avoidance phase: supply chain collaboration and order smoothing*. International Journal of Production Research, vol. 48(22): 6739-6776. Disponible en [fecha de acceso 12.12.2016] <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207540903252308?scroll=top&needAccess=true>
232. Canonaco, P.; Legato, P.; Mazza, R. y Musmanno, R. (2008). *A queuing network model for the management of berth crane operations*. Computers & Operations Research, vol. 35(8): 2432-2446. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.001>
233. Cao, B. y Uebe, G. (1993). *An algorithm for solving capacitated multicommodity p-median transportation problems*. Journal of the Operational Research Society, vol. 44(3): 259–269. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] DOI: [10.2307/2584196](https://doi.org/10.2307/2584196)

-
234. Cao B y Uebe, G. (1995). *Solving transportation problems with nonlinear side constraints with tabu search*. Computers & Operations Research, vol. 22(6): 593–603. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00055-D](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00055-D)
235. Cao, Z.; Lee, D.H. y Meng, Q. (2008). *Deployment strategies of double-rail-mounted gantry crane systems for loading outbound containers in container terminals*. International Journal of Production Economics, vol. 115(1): 221–228. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552730800203X>
236. Cao, Y. (2009). *System Dynamics Analysis On Socio-Economic Impact Of Coal Port Construction Projects*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189360272486327>
237. Cao, J.-X.; Shi, Q. y Lee D.-H. (2010). *Integrated Quay Crane and Yard Truck Schedule Problem in Container Terminals*. Tsingua Science & Technology, vol. 15(4): 467-474. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] DOI: 10.1016/S1007-0214(10)70089-4
238. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014a). *Storage yard operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions*. European Journal Operational Research 235(2): 412–430. ©. Disponible en [fecha de acceso 04.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713008771>
239. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2014b) *Transport operations in container terminals: literature overview, trends, research directions and classification scheme*. European Journal Operational Research 236(1): 1–13. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 04.02.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.023>
240. Carlo, H.J., Vis, I.F.A., Roodbergen, K.J. (2015). *Seaside Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions*. Flexible Services and Manufacturing Journal, vol. 27(2-3): 224-262. Borrador disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10696-013-9178-3>.
241. Carlucci, F. y Cira, A. (2009). *Modelling a plan for seaport investments through a system dynamics approach*. Pomorstvo, vol. 23(2). 405–425. Disponible en [fecha de consulta 27.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/266272688_Modeling_a_plan_for_seaport_investments_through_a_system_dynamics_approach

-
242. Carrascosa, C.; Rebollo, M.; Julian, V. y Botti, V. (2001). *A MAS approach for port container terminal management: the transtainer agent*. Actas de SCI'01, pp 1–5. International Institute of Informatics and Systemics, Orlando, FL (2001). [fecha de consulta 27.02.2017]
http://users.dsic.upv.es/~vinglada/download/MAS_workshop_final.pdf
243. Cartenì, A.; Cantarella, G.E. y de Luca, S. (2005). *A simulation model for a container terminal*. Proceedings of the European Transport Annual Meeting: Transportation Planning Methods, PTRC, 18-20 de Septiembre de 2005, Estrasburgo (Francia). 17 páginas. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017]
abstracts.aetransport.org/paper/download/id/2201
244. Cartenì, A. y de Luca, S. (2009a). *Simulation of a container terminal through a discrete event approach: Literature review and guidelines for application*. Association for European Transport. *AET 2009: European Transport Conference*, (5-7 de Octubre de 2009). Noordwijkerhout (Holanda). 21 páginas. ISBN 978-1-905701-04-9. Disponible en [fecha de acceso 17.01.2017] abstracts.aetransport.org/paper/download/id/3148.
245. Cartenì, A. y de Luca, S. (2009b). *A micro-Simulation of the Salerno Container Terminal*. Technical Paper, Department of Civil Engineering, University of Salerno. Disponible en [fecha de acceso 17.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/228916972_A_micro_simulation_model_for_the_Salerno_Container_Terminal
246. Cartenì, A. y De Luca, S. (2012). *Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 21, pp: 123-145. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/220674619_Tactical_and_strategic_planning_for_a_container_terminal_Modelling_issues_within_a_discrete_event_simulation_approach
247. Caserta, M.; Schwarze, S y Voß, S. (2011). *Container Rehandling at Maritime Container Terminals*. Capítulo 13 del libro “*Handbook of Terminal Planning*” Springer-Verlag New York (Editado por Jürgen W. Böse). ISBN 978-1-4419-8407-4. 433 páginas.
248. Cassettari, L.; Mosca, R.; Revetria, R. y Rolando, F. (2011). *Sizing of a 3,000,000t bulk cargo port through discrete and stochastic simulation integrated with response surface methodology techniques*. Proceedings of the 11th WSEAS International conference on Signal processing, Computational Geometry and Artificial Vision, Florencia (Italia), 2011, pp: 211–216. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/259308707_Sizing_of_a_3000000t_Bulk_Cargo_Port_through_Discrete_and_Stochastic_Simulation_Integrated_with_Response_Surface_Methodology_Techniques
249. Castilho, B. y Daganzo, C. F. (1993). *Handling strategies for import containers at marine terminals*. Transportation Research-B 27(2): 151–166. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019126159390005U>
250. Cegielski, W.H. y Rogers, J.D. (2016). *Rethinking the role of agent-based modeling in archaeology*. Journal of Anthropological Archaeology, vol. 41(2016): 283–298. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaa.2016.01.009>
251. Cellier, F. y Blitz A.E. (1976). *GASP V Simulation: A universal simulation package*. Proceedings of the IFAC Conference, North-Holland Publishing Company © (editor D. Dekker) pp: 391:402 Disponible en [fecha de acceso 22.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/242584336_GASP-V-A_universal_simulation_package
252. Cen, Z. (2011). *LNG Portfolio Optimizacion*. Tesis Doctoral. (Director: J.F. Bonnans) l'École Polytechnique ParistecgCentre de Mathématiques Appliquées - UMR 7641. INRIA Saclay - Île de France. 129 páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] http://www.cmapx.polytechnique.fr/~cen/Thesis_chap1.pdf
253. Černý, V. (1985). *Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm*. Optimization Theory and Applications, vol. 45(1): 41-51. doi:10.1007/BF00940812. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00940812>
254. Chan S.H. (2001). *Dynamic AGV-container job deployment strategy*. Master of Science, National University of Singapore. (2001). Disponible para lectura online en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.docin.com/p-939155213.html>
255. Chan, W.; Son, Y.-J. y Macal, C. (2010). *Agent-based simulation tutorial - simulation of emergent behavior and differences between agent-based simulation and discrete-event simulation*. Proceedings of Winter Simulation Conference 2010, pp: 135 -150. Disponible en [fecha de acceso 01.05.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/014.pdf>
256. Chang H, Y.; Yong S.C. y Tae Y.H. (2004). *Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals*. OR Spectrum, vol. 26(2): 149-170. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] DOI: 10.1007/s00291-003-0151-5

-
257. Chang, D., Yan, W., Chen, C.-H., & Jiang, Z. (2008). *A berth allocation strategy using heuristics algorithm and simulation optimization*. International Journal of Computer Applications in Technology, 32(4): 272-281. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1504/IJCAT.2008.021382>.
258. Chang, D.; Jiang, Z.; Yan, W., y He, J. (2010). *Integrating berth allocation and quay crane assignments*. Transportation Research Part E, vol. 46(6): 975–990. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/223353648_Integrating_berth_allocation_and_quay_crane_assignments
259. Charania, A. C.; Olds, J.R. y De Pasquale, D. (2006) *Sub-Orbital Space Tourism Market: Predictions of the Future Marketplace Using Agent-Based Modeling*. SpaceWorks Engineering, Inc., Atlanta, GA. 57th International Astronautical Congress (IAC'2006), 2-6 de Octubre de 2006, Valencia (España) Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.IAC-06-E3.4.01>
260. Chen C. S.; Lee, S. M. y Shen, Q.S. (1995). *An analytical model for the container loading problem*. European Journal of Operational Research, vol. 80(1): 68–76. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00002-T](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00002-T)
261. Chen, L. (1998). *Optimization problem in a container port*. M.Sc. Research Report, SoC, NUS.
262. Chen, Y. F.; Drezner, Z.; Ryan, J.K. y Simchi-Levi, D (1998). *The Bullwhip Effect: Managerial Insights on the Impact of Forecasting and Information on Variability in a Supply Chain*. Cuantitative Models for Supply Chain Management. International Series in Operations Research & Management Science, vol. 17(1998): 417-439. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-4949-9_14
263. Chen, C.-Y. y Hsieh, T. W. (1999). *A time-space network model for the berth allocation problem*. Proceedings of the 19th Conference on System Modeling and Optimization. Cambridge: Kluwer Academic Publishers.
264. Chen, T. (1999). *Yard operations in the container terminal – a study in the ‘unproductive moves’*. Maritime Policy and Management vol. 26(1): 27–38. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) DOI: [10.1080/030888399287041](https://doi.org/10.1080/030888399287041)
265. Chen, Y. F.; Drezner, Z.; Ryan, J.K. y Simchi-Levi, D. (2000a). *Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times and Information*.

- Management Science, vol. 46(3): 436-443. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) http://www.diku.dk/hjemmesider/ansatte/pisinger/production/SimchiLevi_BullwhipEffectSupplyChain.pdf
266. Chen, Y. F.; Ryan J. K. y Simchi-Levi, D. (2000b). *The Impact of Exponential Smoothing Forecasts on the Bullwhip Effect*. Naval Research Logistics, vol. 47(4): 269—286. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) https://www.researchgate.net/publication/244975380_The_Impact_of_Exponential_Smoothing_Forecasts_on_the_Bullwhip_Effect.
267. Chen, P.; Fu, Z.; Lim, A. y Rodrigues, B. (2003). *The General Yard Allocation Problem*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference - GECCO 2003(Chicago, Estados Unidos) 12-16 Julio 2003. Part II. Lecture Notes in Computer Science 2724, pp: 1986-1997. Enero 2003. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016). DOI: [10.1007/3-540-45110-2_97](https://doi.org/10.1007/3-540-45110-2_97)
268. Chen, Y. y Chen, C. (2004). *Design principle for the handling process and plan layout of commercial automobile Ro/Ro terminal.*, Port & Motorway Engineering, vol. 3(1): 21–23. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SYGC200403007.htm
269. Chen, C.-Y. y Chao, S. L. (2004). *A time-space network model for allocating yard storage space for export containers*. Transportation Planning Journal, vol. 33(2): 227-248. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.5872&rep=rep1&type=pdf>
270. Chen, L., Bostel; N., Dejax, P.; Cai, J. y Xi, L. (2007). *A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal*. European Journal of Operational Research, vol. 18(1): 40–58. Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/222147328_A_tabu_search_algorithm_for_the_integrated_scheduling_problem_of_container_handling_systems_in_a_maritime_terminal
271. Chen, A. I. H. C.; Nishimura, E. y Papadimitriou, S. (2008). *The simultaneous berth and quay crane allocation problem*. Transportation Research, PartE, vol. 44(5): 900-920. Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.03.003>
272. Chen, S.; Frouws, K. y Van De Voorde, E. (2011). *Simulation-based optimization of ship design for dry bulk vessels*. Maritime Economics & Logistics 13(2): 190–212. Disponible

- en [fecha de acceso 05.11.2016]
https://www.researchgate.net/publication/227470419_Simulation-based_optimization_of_ship_design_for_dry_bulk_vessels
273. Chen, J.: Taylor, J.E. y Wei, H.-H. (2012). *Modeling Building Occupant Network Energy Consumption Decision-making: The Interplay Between Network Structure and Conservation*. Energy and Buildings, vol. 47(2012): 515–524. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.026>
274. Chen, J.H.; Lee, D.-H., y Cao J.X. (2011). *Heuristics for quay crane scheduling at indented berth*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 47(6): 1005–1020. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554511000469?np=y&npKey=b06b18f5526c48a6f3370fdd9a14b29314f1b8762c782b3cb9e45861601d19b7>.
275. Chen, L. (2012). *Agent-based modeling in urban and architectural research: A brief literature review*. Frontiers of Architectural Research, vol. 1(2): 166–177. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/257737450_Agent-based_modeling_in_urban_and_architectural_research_A_brief_literature_review
276. Chen, F. y Wang, C. (2013). *Empty container reposition optimization model with feeder transportation*. International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA) 2013: Trade, Supply Chain Activities and Transport: Contemporary Logistics and Maritime Issues (2013). Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://www.hksoa.org/contents/attachments/Presentations/2013/IFSPA2013/Papers/M43.pdf>.
277. Chen, X.; Ong, Y.-S.; Tan, P.-S.; Zhang, N. y Li, Z. (2013). *Agent-based modeling and simulation for supply chain risk management—A survey of the state-of-the-art*. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Manchester (Reino Unido), pp: 1294–1299. Disponible en [fecha de acceso 15.03.2017] https://www.researchgate.net/publication/258512343_Agent-Based_Modeling_and_Simulation_for_Supply_Chain_Risk_Management_-_A_Survey_of_the_State-of-the-Art
278. Cheng, L. Y. (2001). *Simulation study of dynamic AGV-container job deployment scheme*. Master of Science, National University of Singapore. (2001) - HPCES Programme, Singapore-MIT Alliance. 10 páginas. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/4014/HPCES023.pdf>

-
279. Cheng, Y. L.; Sen, H. C.; Natarajan, K.; Teo, C. P. y Tan, K. C. (2005). *Dispatching automated guided vehicles in a container terminal*. Supply Chain Optimization, Applied Optimization, Springer. (2005) (Editado por J. Geunes y P. M. Pardalos), Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://bschool.nus.edu/staff/bizteocp/agv3.pdf>
280. Cheng, J. K., Tahar, R. M., & Ang, C.-L. (2010). *Understanding the Complexity of Container Terminal Operation Through the Development of System Dynamics Model*. International Journal of Shipping and Transport Logistics, vol. 2(4): 429-443. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://dx.doi.org/10.1504/IJSTL.2010.035503>
281. Cheong, C. Y.; Lin, C. J., Tan, K. C. y Liu, D. K. (2007). *A multi-objective evolutionary algorithm for berth allocation in a container port*. Congress on Evolutionary Computation 2007 (CEC 2007), pp: 927-934). Singapur (Singapur):. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.2007.4424569>.
282. Cheong, C.Y., Tan, K.C., Liu, D.K., y Lin, C.J. (2010). *Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports*. Annals of Operations Research, 180(1): 63-103. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-008-0493-0>.
283. Chertkoff, J., y Kushigian, R. (1999). *Don't Panic: The Psychology of Emergency Egress and Ingress*. Editorial Praeger, Londres (Reino Unido). 160 Páginas ISBN-10: 0275962687
284. Cheung, R. K. y Chen, C. Y. (1998), *A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem*. Transportation Science, vol. 32(2): 142–162. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220413042_A_Two-Stage_Stochastic_Network_Model_and_Solution_Methods_for_the_Dynamic_Empty_Container_Allocation_Problem
285. Cheung, R. K.; Li, C. L.; Lin, W., (2002). *Inter block crane deployment in container terminals*. Transportation Science, vol. 36(1): 79-93. . Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] https://www.jstor.org/stable/25768983?seq=1#page_scan_tab_contents
286. Chia, J.T.; Lau, H.C. y Lim, A. (1999). *Ant colony optimization for the ship berthing problem*. Lecture Notes Advances in Computing Science. ASIAN'99. Volumen 1742 (Editado por P.S. Thiagarajan y R. Yap), pp: 359-370. Disponible en [fecha de acceso 12.02.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/7c55/e1cf7d7c76b3ef3effaced5906f71ebdcace.pdf>

287. Chincholkar, A.K. y Krishnaiah Chetty, O.V. (1996). *Simultaneous optimization of control factors in automated storage and retrieval systems and FMS using stochastic colored Petri nets and the Taguchi method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 12(2): 137-144. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] DOI: 10.1007/BF01178954
288. Chincholkar, A.K.; Krishnaiah, C.O.V. y Kuppuswamy, G. (1994). *Analysis of an automated storage and retrieval system using stochastic coloured Petri Nets*. Advances in Modelling & Analysis, part C vol. 44(3): 19-30. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/294201016_Analysis_of_an_automated_storage_and_retrieval_system_using_Stochastic_coloured_Petri_nets
289. Cho, J.; Lim, G.; Biobaku, T.; Bora, S. y Parsaei H. (2014). *Liquefied Natural Gas Ship Route Planning Model Considering Market Trend Change*. Working Paper (recurso no publicado o pendiente de publicación). Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/267623438_Liquefied_Natural_Gas_Ship_Route_Planning_Model_Considering_Market_Trend_Change
290. Choi, Y.S. y Yun, W.Y. (2000). *Simulator for Port Container Terminal Using an Object-Oriented Approach*. Report, Brain Korea 21 Logistics Team. Industrial Engineering/Pusan National University. Disponible en [fecha de acceso 12.02.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/56bc/08cb17ffbd6a62f77316586562b9182786e6.pdf>
291. Choi, Y.S. y Ha, T.Y (2004). *Simulation application for container terminal Using an Object-Oriented Simulation*. Korea Maritime Institute, vol. 19(2): 211-238 Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01812322>
292. Choi, H. R; B. Park, D. Yoo y M. Kang (2007). *A Study on System Dynamics Modelling to Strengthen the Competitiveness of a Container Terminal*. Proceedings of the 2007 WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications, 17-19 de enero 2007, Gold Coast (Australia). Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007australia/papers/550-432.pdf>
293. Choo, S. (2006). *The crane split and sequencing problem with clearance and yard congestion constraints in container terminal ports*. Tesis Doctoral - Massachusetts Institute of Technology, MIT Computation for Design and Optimization Program. Disponible en [fecha de acceso 15.09.2016] <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39219/85844395.pdf?sequence=1>

-
294. Choo, S.; Klabjan, D. y Simchi-Levi, D. (2010). *Multiship crane sequencing with yard congestion constraints*. *Transportation Science* 44(1): 98-115. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220413369_Multiship_Crane_Sequencing_with_Yard_Congestion_Constraints.
295. Choong, S.T.; Cole M.H. y Kutanoglu, E. (2002). *Empty container management for intermodal transportation networks*. *Transportation Research Part E* 38(6): 423-438. . Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(02\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00018-2)
296. Chorafas, D. N. (1965). *Systems and simulation*. New York: Academic Press, vol. 14 de Mathematics and Engineering. Series of Monographs and Textbooks (Editado por Richard Bellman. RAND Corporation, Santa Monica, California). 322 páginas. ISBN 9780080957814 Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=u43Ogf3vs24C&oi=fnd&pg=PP2&ots=z_dgbhKlN2e&sig=SCj1VeTnl1Vvd9Df1a9z8LXYV8Q&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
297. Christiansen, M. y Nygreen, B. (1998). *A method for solving ship routing problems with inventory constraints*. *Annals of Operations Research*, vol. 81(1): 357-378. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] DOI: 10.1023/A:1018921527269
298. Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2004). *Ship routing and scheduling: Status and perspectives*. *Transportation Science*, 38(1): 1-18. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] doi doi>10.1287/trsc.1030.0036
299. Christiansen, M., Fagerholt, K., y Ronen, D. (2004a). *Ship routing and scheduling: Status and perspectives*. *Transportation Science*, vol. 38(1): 1-18. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] doi>10.1287/trsc.1030.0036
300. Christiansen, M.; Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). *Maritime transportation*. Capítulo en “*Handbooks in operations research & management science*: vol. 14. *Transportation*”, pp: 189-284 (Editado por C. Barnhart & G. Laporte). Amsterdam (Holanda). Elsevier B.V.. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] DOI: 10.1016/S0927-0507(06)14004-9
301. Christiansen, M. y Fagerholt, K. (2008). *Maritime inventory routing problems*. *Encyclopedia of optimization* (2nd Edition) (Editado por C.A. Floudas & P.M. Pardalos),

- pp: 1947–1955. Springer; (4 de Septiembre de 2008). 622 pages. ISBN-10: 0387747583. ISBN-13: 978-0387747583
302. Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Hasle, G.; Minsaas, A. y Ronen, D. (2009). *Maritime Transport Optimization: An ocean of opportunities*. Operational Research Today (OS Today) Abril 2009, pp: 26-31. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/237494127_AN_OCEAN_OF_OPPORTUNITIES
 303. Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Flatberg, T.; Haugen, Ø.; Kloster, O. y Lund, E. (2011). *Maritime inventory routing with multiple products: a case study from the cement industry*. European Journal of Operational Research, vol. 208(1):86–94. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.023>
 304. Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Nygreen, B. y Ronen, D. (2013). *Ship routing and scheduling in the new millennium*. European Journal of Operational Research, vol. 228(3): 467–483 Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.002>
 305. Chu, C. Y. y Huang, W. C. (2002). *Aggregates cranes handling capacity of container terminals: the port of Kaohsiung*. Maritime Policy and Management, vol. 29(4): 341-350. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: 10.1080/03088830210144314
 306. Chuang, J.-H. y Ahuja, N. (1991). *Path planning using the Newtonian potential*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1(1): 558-563. Disponible en [fecha de acceso 08.05.2017] http://vision.ai.illinois.edu/publications/path_planning_ICRA_1991.pdf
 307. Chung K.C (1993). *Port Performance Indicators*. Transportation, Water and Urban Development Department of World Bank, Transport No. PS-6. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] <http://documents.worldbank.org/curated/en/303501468337289364/pdf/816090BRI0Infr00Box379840B00PUBLIC0.pdf>
 308. Chung, Y. C.; Randhawa, S. U. y McDowell, E. D. (1988). *A simulation analysis for a transtainer-based container handling facility*. Computers and Industrial Engineering, vol. 14(2):113-125. Disponible en [fecha de acceso 20.03.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360835288900204>
 309. Chung, S.H. y Choy, K.L. (2012). *A modified genetic algorithm for quay crane scheduling operations*. Expert Systems with Applications, vol. 39(4): 4213–4221. Disponible en

- [fecha de acceso 28.01.2017]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417411014369>
310. Chung, S.H. y Chan F.T.S. (2013). *A workload balancing genetic algorithm for the quay crane scheduling problem*. International Journal of Production Research vol. 51(16): 4820-4834 Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017].
<http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.774489>.
311. Cincimino, E.; Cannella, S.; Brucoleri, M. y Framinan, J.M. (2012). *On the Bullwhip Avoidance Phase: The Synchronised Supply Chain*. European Journal of Operational Research, vol. 221(1): 49–63. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712001890>
312. Cigolini, R. y Rossi, T (2010). *Sizing off-shore transshipment systems in dry-bulk transportation*. Production Planning and Control, vol. 21(5): 508-522. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.11.2016] DOI: [10.1080/09537280903514587](https://doi.org/10.1080/09537280903514587)
313. Cigolini, R.; Pero, M.; Rossi, T (2011): *Sizing off-shore transshipment systems: A case study in maritime dry-bulk transportation*. Production Planning and Control 24(1): 1-13. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] DOI: [10.1080/09537287.2011.598266](https://doi.org/10.1080/09537287.2011.598266).
314. Cigolini, R.; Pero, M.; Rossi, T. y Sianes, A. (2013): *Using simulation to optimize transshipment systems: applications in field*. Maritime Economics & Logistics 15(3): 332–348. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.11.2016]
<https://www.researchgate.net/publication/263326126> Using simulation to optimize transshipment systems Applications in field
315. Collier, P. I. (1980). *Simulation as an aid to the study of a port as a system*. Computer Application in Shipping and Shipbuilding, vol. 7(1980): 51-56.
316. Collier, N.; Howe, T., y North, M. J. (2003). *Onward and upward: The transition to Repast 2.0*. Proceedings of the 1st Annual North American Association for Computational Social and Organizational Science Conference. (Pittsburgh, Estados Unidos), North American Association for Computational Social and Organizational Science. pp: 1-6. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016)
<https://www.researchgate.net/publication/228958695> Onward and upward The transition to Repast 20
317. Comer, E. y Taborga, P.N. (1974). *Port simulation model (PORTSIM), user's manual*. The World Bank, Washington (Estados Unidos).

318. Conway, S. R. (2006). *An Agent-Based Model for Analyzing Control Policies and the Dynamic Service-Time Performance of a Capacity-Constrained Air Traffic Management Facility*. Proceedings of ICAS 2006 – 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. 3-8 de Septiembre de 2006, Hamburgo (Alemania). Disponible en [fecha de acceso 25.03.2017] http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2006/PAPERS/564.PDF
319. Cooper, R.B. y Murray G. (1969). *Queues Served in Cyclic Order*. The bell system Technical Journal March 1969, pp: 675-689. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] http://www.cse.fau.edu/~bob/publications/Cooper_1970.pdf
320. Cordeau, J.F.; Laporte, G.; Legato, P. y Moccia P. (2005a). *Models and Tabu Search Heuristics for the Berth-Allocation Problem*. Transportation Science, vol. 39(4): 526-538. Disponible en [feccha de último acceso el 25.10.2016] DOI: [10.1287/trsc.1050.0120](https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0120)
321. Cordeau, J. -F.; Gaudioso, M.; Laporte, G. y Moccia, L. (2005b). *A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal*. AIRO annual conference. Amerino (Italia), 6–9 Septiembre 2005. Publicado en Naval Research Logistics 53(1):45 - 59 (2006). Disponible en [fecha de acceso 25.03.2017] en DOI: [10.1002/nav.20121](https://doi.org/10.1002/nav.20121)
322. Cordeau, J. F.; Gaudioso, M.; Laporte, G. y Moccia, L. (2007). *The service allocation problem at the Gioia Tauro maritime terminal*. European Journal of Operational Research 176: 1167–1184. (2007). Disponible en [feccha de último acceso el 25.10.2016] <http://neumann.hec.ca/chairedistributique/common/SAP.pdf>
323. Cormen, T. H.; Leiserson, C.E. y Rivest, R. L. (1990). *Introduction to Algorithms (1st Edition)*. MIT Press and McGraw-Hill. ISBN 0-262-03141-8.
324. Cormen, T.H.; Leiserson, C.E.; Rivest, R.L. y Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms*. Capítulo 16 de "Greedy Algorithms". MIT Press. 1312 páginas. ISBN: 9780262033848
325. Cortés P.; Muñuzuri J.; Ibáñez, J.N. y Guadix, J. (2007). *Simulation of freight traffic in the Seville inland port*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 15(3): 256–271. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] http://io.us.es/componentes/P.Cortes/pdfs/Sim_freight_Seville_inland_Port.pdf
326. Cosma, E.P.; Pérez, F.; Morales, A. y Robles, T. (2013). *e-Flow – Sistema integral inteligente de soporte a la evacuación*. 52º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de

- Madrid, Madrid (España). Recurso en línea. 40 páginas. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] [https://www.researchgate.net/publication/258200894_e-Flow - Sistema integral inteligente de soporte a la evacuacion](https://www.researchgate.net/publication/258200894_e-Flow_-_Sistema_integral_inteligente_de_soporte_a_la_evacuacion)
327. Cosmetatos, G. P. (1975). *Approximate explicit formulae for the average queueing time in the processes (M/D/r) and (D/M/r)*. INFOR, Information Systems and Operational Research, vol. 13(3): 328-331. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1080/03155986.1975.11731618](https://doi.org/10.1080/03155986.1975.11731618).
328. Cosmetatos, G. P. (1976). *Some approximate equilibrium results for the multiserver queue (M/G/r)*. Operational Research Quarterly, 1976, vol. 27(3): 615-620. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1057/jors.1976.120](https://doi.org/10.1057/jors.1976.120)
329. Cox, S.W. *GPSS World: A brief preview (1991)*. Simulation Conference, 1991. Proceedings of the Winter Simulation Conference 1991, pp: 59-61 (1991). Disponible bajo en [fecha de acceso 15.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/3528117_GPSS_World_A_brief_preview
330. Crain, R.C. (1997). *Simulation using GPSS/H*. Proceedings of the 29th conference on Winter Simulation Conference (Diciembre 1997). pp: 567-573. Editado por S. Andradóttir, K.J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0567.PDF>.
331. Crain, R.C. y Henriksen, J.O. (1999). *Simulation using GPSS/H*. Proceedings of the Simulation Conference Proceedings, 1999 Winter Simulation Conference 02/1999. (1999). Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/023.PDF>
332. Crainic, T. G.; Gendreau, M. y Dejax, P. (1993). *Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers*. Operations Research vol. 41(1): 102–126. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <http://www.jstor.org/stable/171947>
333. Cranefield, S.; Jarquin, R.; Li, G.; Martin, B. Unlan, R.; Wagner, H.-F.; Winikoff, M. y Young, T. (2011). *Agent-Based Container Terminal Optimisation (Extended Abstract)*. Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011), Extended Paper R-24, Session R, pp: 1113-1114. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <http://www.aamas-conference.org/Proceedings/aamas2011/papers/R24.pdf>
334. Crooks, A.; Castle, C. y Batty, M. (2008). *Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation*. Computers, Environment and Urban Systems vol. 32(6): 417–

430. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.004>
335. Crooks, A.T. y Heppenstall, A.J. (2012). *Introduction to agent-based modelling*. Incluido en *Agent-Based Models of Geographical Systems*. ISBN: 978-90-481-8926-7 (Editado por A.J. Heppenstall, A.T. Crooks, L.M. See y M. Batty). Springer: New York, pp: 85–108. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017]
<http://www.springer.com/us/book/9789048189267>
336. Crooks, A.T. y Wise, S. (2013). *GIS and agent-based models for humanitarian assistance*. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 41 (2013): 100–111. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.05.003>
337. Croope, S.V. y McNeil, S. (2011). *Improving Resilience of Critical Infrastructure Systems Postdisaster*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2234, pp: 3–13. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.3141/2234-01>
338. Crow, E.L.; Frances, A.D. y Margaret, W.M. (1960). *Statistics Manual with examples taken from Ordnance Development*. Dover Publications, Inc. Nueva York (Estados Unidos), pp: 83-106. ISBN-13: 978-0486605999. (320 páginas).
339. CSIM (2015). *CSIM - Parallel Process and Diagrams Simulator*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 18.11.2016]
http://www.csim.com/simulator/csim_doc.html
340. CSIM (2016a). *Introduction to CSIM Modeling Environment*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.csim.com/overview.html>
341. CSIM (2016b). *CSIM Modeling Domains*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.csim.com/domains/index.html>
342. CSIM (2016c). *CSIM Tool News*. © CSIM.com. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.csim.com/status.html#v4.10>
343. Cui J.X. (2007). *A Study Of Yangtze River Delta Port Group Logistics System Based On System Dynamics Developing In Correspond*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017]
<http://www.globethesis.com/?t=2189360212455725>

-
344. Cyr, R.W. (1992). *Using animation to enhance a marine-terminal Monte Carlo simulator*. Proceedings of the 24th Winter Simulation Conference – Año 1992. Editado por J.L. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain y J.R. Wilson, pp: 1000-1003. ISBN: 0-7803-0798-4. doi>10.1145/167293.167808. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] http://informatics-sim.org/wsc92papers/1992_0132.pdf
345. Daganzo, C.F. (1989). *The crane scheduling problem*. Transportation Research B. vol. 23(3): 159–175. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261589900015>
346. Daganzo, C. F. (1990a). *Crane productivity and ship delay in ports*. Transportation Research Record, vol.1251(1990): 1-9. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/291155457_Crane_productivity_and_ship_delay_in_ports
347. Daganzo, C. F. (1990b). *The productivity of multipurpose seaport terminals*. Transportation Science, vol. 24(3): 205-216. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1287/trsc.24.3.205](https://doi.org/10.1287/trsc.24.3.205)
348. Dahal, K.P.; Burt, G.M.; McDonald; J.R. y Moyes, A. (2001). *A case study of scheduling storage tanks using a hybrid genetic algorithm*. Transactions on Evolutionary Computation, vol. 5(2001): 283–294 . Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/27312827_A_Case_Study_of_Scheduling_Storage_Tanks_Using_a_Hybrid_Genetic_Algorithm
349. Dahal, K.P.; Galloway, S.; Burty, G.M.; McDonald; J.R. y Hopkins, I. (2003). *A port system simulation facility with an optimization capability*. International Journal of Computational Intelligence and Applications, Vol. 3(4): 395-410. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] DOI: [10.1142/S1469026803001099](https://doi.org/10.1142/S1469026803001099)
350. Dahal, K.P.; Galloway S.J.; Burt, G.M.; McDonald, J.R. y Hopkins, I. (2005). *A Case Study of Process Facility Optimization using Discrete Event Simulation and Genetic Algorithm*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'05), 25-29 Junio 2005, Washington, DC (Estados Unidos). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220740838_A_case_study_of_facility_optimization_using_discrete_event_simulation_and_algorithm
351. Dahal, K.P.; Galloway, S.; Burty, G.M.; McDonald; J.R. y Hopkins, I. (2007). *Modelling, simulation and optimisation of port system management*. International Journal of Agile

- Systems and Management, vol. 2(1): 92–108. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/228624110_Modelling_simulation_and_optimisation_of_port_system_management
352. Dahl, O.-J. y Nygaard, K. (1965). *SIMULA – A lenguaje for programming and description of discrete event systems. Introduction and user's manual*. Norweigan Computer Center Doc. Oslo (Noruega). 162 páginas
 353. Dahl, O.-J. y Nygaard, K. (1966). *SIMULA: an ALGOL-based simulation language*. Communications of the ACM, vol. 9(9): 671-678. Septiembre 1966.
 354. Dahl, K. (2007). *Optimization of the LNG-value chain*. Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2007. Trondheim (Noruega).
 355. Dahle, H.P.; Løfgren, M.; Madsen, O.L. y Magnusson, B. (1986). *The Mjølnær Project – A Highly Efficient Programming Environment for Industrial Use*. Mjølnær report no. 1, Oslo, Malmø, Aarhus, Lund 1986. Oslo (Noruega)
 356. Dai, J.; Lin, W.; Moorthy, R. y Teo C.P. (2004). *Berth Allocation Planning Optimization in Container Terminal*, Primera versión (no editada) - Working Paper, Georgia Institute of Technology, National University of Singapore, de fecha 2004 disponible en [fecha de acceso 15-09-2014] <http://bschool.nus.edu/staff/bizteocp/berthplanningjuly2004.pdf>. Posteriormente publicada en Dai *et al.* (2008).
 357. Dai, J.; Lin, W.; Moorthy, R. y Teo, C.P. (2008). *Berth allocation planning optimization in container terminals*, en C. S. Tang, C. P. Teo y K. K. Wei (eds.) Supply Chain Analysis, vol. 119 de International Series in Operations Research & Management Science, pp: 69–104. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <https://people.orie.cornell.edu/jdai/publications/daiLinMoorthyTeo08.pdf>
 358. Dai, X.J. (2012). *The Port Development Research Based On Hinterland's Economy And Competition And Cooperation Among Port Group*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2249330362968023>
 359. Dalziell, E. P., y McManus, S.T. (2004). *Resilience, Vulnerability, and Adaptive Capacity: Implications for System Performance*. Proceedings of the International Forum for Engineering Decision Making (IFED'04). 6-8 de Diciembre de 2004, Stoos (Suiza). 17 páginas. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/2809>

-
360. Danskin, J.M. (1967). *The Theory of Max-Min and its Applications to Weapons Allocation Problems*. Econometrics and Operations Research, vol.5 (1967) (Ed. Springer Berlin Heidelberg). ISBN: 978-3-642-46094-4 (Print) 978-3-642-46092-0 (Online)
361. Dantzig, G.B. y Fulkerson, D.R. (1954). *Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule*. Naval Research Logistics Quarterly, vol. 1(3): 217-222. DOI: 10.1002/nav.3800010309. Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/604400.pdf>
362. Dantzig, G.B. y Wolfe, F. (1960). *Decomposition Principle for Linear Programs*. Operations Research, vol. 8(1): 101–111. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] [doi:10.1287/opre.8.1.101](https://doi.org/10.1287/opre.8.1.101).
363. Dash (1999). *XPRESS-MP Reference Manual*. Dash Associates Limited (Warwickshire, Reino Unido). 100 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] <http://www.cs.elte.hu/docs/XPRESS/UGUIDE11.PDF>
364. Dash (2000). *XPRESS-MP: Modeller Subroutine Library XMSL Reference Manual* Dash Associates Limited (Warwickshire, Reino Unido). (10 de Junio de 2000). 20 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] <http://www.cs.elte.hu/docs/XPRESS/XMSL12.PDF>
365. Dash (2002). *Xpress-Mosel Language: Reference Manual*. Dash Optimization Ltd. Englewood Cliffs (Nueva York, Estados Unidos). 232 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] http://home.deib.polimi.it/malucell/didattica/appunti/mosel/mosel-language_reference.pdf
366. Daskin, M. y Walton, C.M. (1983). *An approximate analytic model for supertanker lightering operations*. Transportation Research B, vol. 17(3): 201-219. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(83\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0191-2615(83)90015-2)
367. David, R. y Alla, H. (1994). *Petri nets for modeling of dynamical systems: a survey*. Automatica, vol. 30(2): 175–202. Disponible en [fecha de acceso 30.11.2016] [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(94\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(94)90024-8)
368. Davidsson, P. y Johansson, S (2002). *Evaluating Multi-Agent System Architectures: A case study concerning dynamic resource allocation*. Proceedings of the 3rd International Workshop on Engineering Societies in the Agents' World, Madrid (España) (2002). 13 páginas Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/2852838_Evaluating_Multi-

agent System Architectures A Case Study Concerning Dynamic Resource Allocation

369. Davidsson, P.; Johansson, S.; Persson, J. y Wernstedt, F. (2003). *Agent-based approaches and classical optimization techniques for dynamic distributed resource allocation: A preliminary study*. Workshop on Representations and Approaches for Time-Critical Decentralized (AAMAS'03). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]. 4 páginas. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.8.3843&rep=rep1&type=pdf>
370. Davidsson, P., Henesey, L. E., Ramstedt, L., Törnquist, J., y Wernstedt, F., (2005a). *Agent-Based Approaches to Transport Logistics*. Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation: Whitestein Series in Software Agent Technologies, pp: 1-15 (Bazzan, Ana; Klügl, Franziska; Ossowski, Sascha). Editado por Birkhäuser. ISBN 10.1007/3-7643-7363-6_1. ISBN 978-3-7643-7258-3. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-7643-7363-6_1
371. Davidsson, P.; Henesey, L. E.; Ramstedt, L.; Törnquist, J. y Wernstedt, F. (2005b). *Agent-Based Approaches to Transport Logistics*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 13(4): 255-271. DOI: 10.1016/j.trc.2005.07.002. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/222649741_Agent-Based_Approaches_to_Transport_Logistics
372. Davies, A.P. y Bischoff, E.E. (1998). *Weight distribution considerations in container loading*. Working Paper, European Business Management School, Statistics and OR Group, University ofWales, Swansea. Posteriormente también publicado en European Journal of Operational Research 114(3): 509–527. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00139-8)
373. Davies, A.P. y Bischoff, E.E. (1999). *Weight distribution considerations in container loading*. Working Paper, European Business Management School, Statistics and OR Group, University of Wales, Swansea (1998). Posteriormente publicado en European Journal of Operational Research vol. 114(3): 509–527. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00139-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00139-8)
374. Davis, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York. Hardcover:. Van Nostrand Reinhold; 1ª Edición (Enero 1991). 385 Páginas. ISBN-10: 0442001738 / ISBN-13: 978-0442001735.
375. de Koster, R. B. M., Le-Duc, T. y Roodbergen, K.J. (2007). *Design and control of warehouse order picking: A literature review*. European Journal of Operational

- Research, vol. 182(2): 481–501. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://www.roodbergen.com/publications/EJOR2007.pdf>
376. de Koster, R. B. M., Le-Duc, T. y Yugang, Y. (2008). *Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS*. International Journal of Production Research, vol. 46(6): 1495–1514. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00512947/document>
377. de la Peña, I. (2006). *Ensayos Físicos para el Dimensionamiento Estructural del Manto de un dique de abrigo: Teoría y Aplicación Práctica*. Trabajo titulado para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados. Universidad de A Coruña (A Coruña, España). 73 Páginas.
378. de la Peña, I. (2011). *Port of Ferrol enlargement Works*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, vol. 164 (MA2): 49–58. Disponible en [fecha de acceso 03.05.2017] doi: [10.1680/maen.2011.164.2.49](https://doi.org/10.1680/maen.2011.164.2.49)
379. de la Peña, I. y Canales M.I. (2012). *Logística del tráfico de GNL y sus implicaciones en el desarrollo de infraestructuras y servicios portuarios: Pasado, Presente y Perspectivas de Futuro*. Proceedings of the II Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering, pp 255-277. Valencia (España) (Mayo 2012). Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/258698309_LOGISTICA_DEL_TRAFICO_DE_GNL_Y_SUS_IMPLICACIONES_EN_EL_DESARROLLO_DE_INFRAESTRUCTURAS_Y_SERVICIOS_PORTUARIOS_PASADO_PRESENTE_Y_PERSPECTIVAS_DE_FUTURO
380. Deere, S.; Galea, E.R.; Lawrence, P. y Gwynne, S. (2006) *The Impact of the passenger response time distribution on ship evacuation performance*. Transactions of The Royal Institution of Naval Architects, vol.148, Part A1 (Journal of Maritime Engineering), ISSN 1479-8751, pp 35-44, 2006. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
381. Deere, S.; Galea, E.R. y Lawrence, P. (2008). *Assessing Naval Ship Design for Human Factor: Issues Associated with Evacuation and Normal Operations*”, Proceedings of the 7th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries - COMPIT08, (Ed: V.Bertram y P. Rigo), 21-23 Abril 2008, Lieja (Bélgica), ISBN-10 2-9600785-0-0, pp: 33-47. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://www.anast.ulg.ac.be/COMPIT08/>
382. Degano, C. y Pellegrino, A. (2002). *Multi-Agent Coordination and Collaboration for Control and Optimization Strategies in an Intermodal Container Terminal*. Proceedings

- of the IEEE International Engineering Management Conference (IEMC-2002), 18-20 de Agosto de 2002, Cambridge, Reino Unido, vol. 2. DOI: 10.1109/IEMC.2002.1038502. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 17.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/3970611_Multi-agent_coordination_and_collaboration_for_control_and_optimization_strategies_in_an_intermodal_container_terminal
383. Dekker, T.C. y de Jong, A.J. (1989). *Concentratie van de overslag van binnenvaartcontainers in de haven van Rotterdam*. Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, Rotterdam (Holanda).
384. Dekker R.; Voogd P. y van Asperen, E. (2006). *Advanced methods for container stacking*. OR Spectrum 28(4): 563-586. Disponible en [fecha de acceso 17.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/226468887_Advanced_methods_for_container_stacking
385. Delgado A. y Jensen S. C. (2009). *Generating Optimal Stowage Plans for Container Vessel Bays*. Principles and Practice of Constraint Programming – CP, pp: 6- 20. Disponible en [fecha de acceso 17.01.2017] DOI: 10.1007/978-3-642-04244-7_4
386. Delorme, X.; Gandibleux, X. y Rodriguez, J. (2003). *GRASP for set packing problems*. European Journal of Operational Research, vol. 153(3): 564-580. Disponible en [fecha de acceso 21.11.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00263-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00263-7)
387. Delphi (2016). *Delphi 2010*. Embarcadero Technologies, Inc. San Francisco, California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016] <https://www.embarcadero.com/es/products/delphi>
388. Demetrescu, C.; Finocchi, I. y Ribichini, A. (2011). *Reactive Imperative Programming with Dataflow Constraints*. Proceedings of the 2011 ACM international conference on Object oriented programming systems languages and applications. pp: 407–426. ISBN: 978-1-4503-0940-0 / doi>10.1145/2048066.2048100. Disponible en [fecha de acceso 21.11.2016]. https://www.researchgate.net/publication/51887489_Reactive_Imperative_Programming_with_Dataflow_Constraints.
389. Demirci, E. (2003). *Simulation Modelling and Analysis of a Port Investment*. SIMULATION, Vol. 79(2): 94-105 The Society for Modeling and Simulation International. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] <http://simulation.su/uploads/files/default/2003-emrullah-demirci.pdf>

-
390. Deng, J.-L. (1982). *Control problems of grey systems*. Systems & Control Letters, vol. 1(5): 288–294. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017]. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6911\(82\)80025-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X)
391. Di Francesco, M. (2007). *New optimization model for empty container management*. Tesis Doctoral. Universidad de Cagliari. (2007). 120 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] http://veprints.unica.it/107/1/di_francesco_massimo.pdf
392. Diamond, B.; Krah, D.; Nastasi, A. y Tag, P. (2010). *ExtendSIM advanced technology: integrated simulation database*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, y E. Yücesan. Páginas: 32-39. Disponible en [fecha de acceso 17.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/004.pdf>
393. Dias, J.C.Q.; Calado, J.M.F y Mendonça, M.C. (2010). *The role of European «ro-ro» port terminals in the automotive supply chain management*. Journal of Transport Geography, vol. 18(1): 116-124. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] <https://core.ac.Reino Unido/download/pdf/19126670.pdf>
394. Dias, L.M.S.; Pereira, G.A.B., Vik, P. y Oliveira, J.A. (2011). *Discrete simulation tools ranking – A comercial software packages comparison based on popularity*. ISC 2011, Industrial Simulation Conference, (6-8 de Junio de 2011). Venecia (Italia). Disponible en [fecha de acceso 17.11.2016] http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/15634/1/ISC_2011_Veneza_5_10.pdf
395. Dijkstra, E.W. (1959). *A Note on Two Problems in Connexion with Graphs*. Numerische Mathematik 23(3): 269–271. . Disponible en [fecha de acceso 12.11.2016] <http://www-m3.ma.tum.de/foswiki/pub/MN0506/WebHome/dijkstra.pdf>
396. Disney, S.M. y Towill, D.R. (2003). *On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy*. Omega, vol. 31(3): 157-167. Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048303000288>.
397. Dong, Y. y Liu X. (Dong, Y. and Liu, X. (2009) *An Interactive Simulation System for Process System of Bulk Cargo Terminal*. Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China. Amercian Society of Civil Engineers (ASCE), pp: 4388-4397. doi: 10.1061/40996(330)641. Disponible en <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40996%28330%29641>

-
398. Dooly, D.R. y Lee, H.F. (2008). *A shift-based sequencing method for twin-shuttle automated storage and retrieval systems*. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers), vol. 40(6): 586–594. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/07408170701730776>
399. Douligeris, C.; Iakovou, E.; Englehardt, J.D.; Li, H.; Ip, C.M. y Mooers, C.N.K. (1997). *Development of a national marine oil transportation system model*. Spill Science & Technology Bulletin, vol. 4(2):113-121. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00022-4. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/222503893_Development_of_a_National_Marine_Oil_Transportation_System_Model
400. Douma, A.M.; Schuur, P.C. y Schutten, J.M.J. (2007). *Barge rotation planning and quay scheduling in the port of Rotterdam*. Universidad de Twente (Holanda) - Beta working paper WP-217. 32 páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] <https://core.ac.Reino Unido/download/pdf/11473731.pdf>
401. Douma, A.M. (2008): *Aligning the operations of barges and terminals through distributed planning*. Ph.D. thesis, Operations Management and Logistics (Departamentos de Technology Management, and Mathematics and Computing Science (Universidad de Eindhoven) y Centre for Telematics and Information Technology (Universidad de Twente), Diciembre 2008. 255 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] http://doc.utwente.nl/60220/1/thesis_Douma%2C_Albert.pdf
402. Douma, A.M.; Schutten, J.M.J. y Schuur, P.C. (2009). *Waiting profiles: an efficient protocol for enabling distributed planning of container barge rotations along terminals in the Port of Rotterdam*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 17(2): 133–148. Disponible en [fecha de acceso 26.04.2017] <http://doi.org/10.1016/j.trc.2008.06.003>
403. Douma, A.M.; Schuur, P.C. y Schutten, J.M.J. (2011). *Aligning barge and terminal operations using service-time profiles*. Flexible Services and Manufacturing Journal, vol. 23(4): 385–421. Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] <http://doc.utwente.nl/76946/1/aligning.pdf>
404. Douma, A.M., van Hillegersberg, J. y Schuur, P. (2012) *Design and evaluation of a simulation game to introduce a multi-agent system for barge handling in a seaport*. Decision support systems, vol. 53(3): 465 - 472. ISSN 0167-9236 Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] <http://doc.utwente.nl/79921/4/Douma12design.pdf>

-
405. Dragović, B.; Park, N.K.; Radmilović, Z. y Maraš, V. (2005a). *Simulation modeling of ship-berth link with priority service*. Maritime Economics & Logistics, Vol. 7(4): 316-335. doi:10.1057/palgrave.mel.9100141 Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) <http://link.springer.com/article/10.1057/palgrave.mel.9100141>
406. Dragović, B.; Park, N. K. y Maraš, V. (2005b). *Simulation modeling of ship-berth link in container port*. Proceedings of the International Association of Maritime Economists Conference (IAME) 23-25 de Junio de 2005. Limasol (Chipre). 10 páginas.
407. Dragović B., Park N. K. y Radmilović Z. (2006a). *Ship-berth link performance evaluation – simulation and analytical approaches*. Maritime Policy & Management, vol. 33(3): 281-299. DOI: 10.1080/03088830600783277 Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/233548170_Ship-berth_link_performance_evaluation_Simulation_and_analytical_approaches
408. Dragović B.; Zrnić N. Dj.; Radmilović, Z. (2006b). *Ports & container terminals modeling*. Research Monograph, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade (2006). ISBN 86-7395-203-4.
409. Dragović, B.; Park, N.K.; Meštrović, R. y Mihaljević, N. (2009a). *Container terminals modelling: New approaches to investigation*. Proceedings of the International Association of Maritime Economists Conference (IAME-2009), 24-26 de Junio de 2009, Copenague (Dinamarca), pp: 1-20.
410. Dragović, B.; Park, N.K.; Meštrović, R.; Kim. J.Y; Raskovic, M. y Mihaljević, N. (2009b). *Modeling and optimizacion of container terminal operations*. 9th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry"- RaDMI 2009(16 – 19 Septiembre 2009) Vrnjačka Banja, Serbia. pp 29-42- Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) <http://satcip.com/radmi/pdf/RaDMI-2009-Proceedings-Vol.1.pdf>
411. Dragović, B.; Zrnić, Dj. N.; Twrdy, E. y Rooy, D.K. (2010). *Ship traffic modelling and performance evaluation in container port*. Analele Universităţii "Eftimie Murgu", 2010, vol. XVII(2): 127-138. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/227635704_Ship_Traffic_Modeling_and_Performance_Evaluation_in_Container_Port
412. Dragovic, B. y Zrnic, N. (2011). *A Queueing Model Study of Port Performance Evolution*. Analele Universităţii "Eftimie Murgu", vol. XVIII(2): 65-76. ISSN 1453 – 7397. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/227635708_A_Queueing_Model_Study_of_Port_Performance_Evolution

413. Dragovic, B.; Tzannatos, E. y Park, N.K. (2016). *Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool*. Flexible Services and Manufacturing Journal, pp: 1-31.. DOI 10.1007/s10696-016-9239-5. © Springer Science & Business Media (New York 2016). Disponible en [fecha de acceso 07.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/295789843_Simulation_modelling_in_ports_and_container_terminals_literature_overview_and_analysis_by_research_field_application_area_and_tool
414. Drew, D.; Adulbhan, P.; Woo, W.L. y Juaseekoon, M. (1972). *Capacity-feedback relationship for port of Bangkok*. Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 98(3): 393-415.
415. Drewry (1999). *Market Outlook for car carriers*. Drewry Shipping Consultants Ltd. Drewry House, Meridian Gate-South Quay, 23 Marsh Wall, London E14 9FJ, Londres (Inglaterra)
416. Drira, A.; Pierreval, H. y Hajri-Gabouj S. (2007). *Facility layout problems: A survey*. Annual Reviews in Control 01/2007 - Elsevier Ltd. Disponible en [fecha e último acceso el 15.01.2017] http://www.researchgate.net/publication/223507648_Facility_layout_problems_A_survey
417. Drucker, N. y Campbell, K. (2015). *An Adaptive Planning Tool for Ship Construction Warehouse Capacities*. MODSIM World 2015. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] http://modsimworld.org/papers/2015/An_Adaptive_Planning_Tool_for_Ship_Construction_Warehouse_Capacities.pdf.
418. Dubrovsky, O.; Levitin, G. y Penn M. (2002). *A genetic algorithm with a compact solution encoding for the container ship stowage problem*. Journal of Heuristics vol. 8(6): 585–599. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1020373709350>
419. Duinkerken, M.B. y Ottjes, J.A. (2000). *A simulation model for automated container terminals*. Proceedings of the Business and Industry Simulation Symposium (ASCT 1999) – April 2000 Wahsington DC (Estados Unidos). ISBN 1-56555-199-0. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.tomasweb.com/publications/was0004a.pdf>
420. Duinkerken, M.B.; Ottjes, J.A. y Lodewijks G. (2002). *The Application of Distributed Simulation in TOMAS: Redesigning a Complex Transportation Model*.

- Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (WSC 2002). Editado por E. Yücesan, C-H. Chen, J.I. Snowdon y J.M. Charnes. Diciembre 2002. San Diego (Estados Unidos). ISBN 0-7803-7615-3 Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] <http://www.tomasweb.com/publications/san0212.pdf>
421. Duinkerken, M.B.; Nuttall, A.J.G.; Ottjes, J.A. y Lodewijks, G. (2005). *Developing an AGV motion controller using simulation, emulation and prototyping*. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. Las Vegas, Nevada (Estados Unidos), pp: 396-399. ISBN: 0-7803-8961-1. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.03.2017] <http://wbmttt.tudelft.nl/users/duinkerker/papers/las0506.pdf>
422. Duinkerken, M. B.; Ottjes, J. A. y Lodewijks, G. (2006). *Comparison of routing strategies for AGV systems using simulation*. Proceedings of Winter Simulation Conference, 3–6 de diciembre de 2006. Monterey, California (Estados Unidos). Editado por L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol, y R. M. Fujimoto, pp: 1524-1530. Disponible en [fecha de acceso 24.03.2017] <http://informs-sim.org/wsc06papers/193.pdf>
423. Dundovic, C.; Bilic, M. y Dvornik, J. (2009). *Contribution to the development of a simulation model for seaport in specific operating conditions*. Promet – Traffic&Transportation, Vol. 21(5): 331-340. Disponible en [fecha de acceso 15.02.2017] www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/248/153
424. Dutton, J., y Starbuck, W. (1971a): “*Computer simulation of human behavior*”. New York: Wiley. Posteriormente revisado en Starbuck, W. (1983) “*Computer simulation of human behavior*” Systems Simulation and Behavioral Science, vol. 28(2): 154–165. DOI: 10.1002/bs.3830280207 Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/227631355_Computer_simulation_of_human_behavior
425. Dutton, J., y Starbuck, W. (1971b). *Computer simulation models of human behavior: a history of an intellectual technology*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1(2): 128-171. 3830280207 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/3114757_Computer_Simulation_Models_of_Human_Behavior_A_History_of_an_Intellectual_Technology
426. Dvornik, J.; Munitic, A. y Bilic, M. (2006). *Simulation modelling and heuristic optimization of material flow of the port cargo system*. Promet- Traffic&Transportation, Vol. 18, 2006, No. 2, PP. 123-135. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017]

- https://www.researchgate.net/publication/298579491_Simulation_Modelling_and_Heuristics_Optimization_of_Material_Flow_of_the_Port_Cargo_System
427. Easa, M.S. (1987). *Approximate queueing models for analyzing harbor terminal operations*. Transportation Research B, 1987, vol. 21(4): 269-286. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261587900270>
 428. Edmon, E.D. (1975). *Operating Capacity of Container Berths for scheduled services by Queue Theory*. The Dock and Harbor Authority, vol.56(161): 230-234.
 429. Edmond, E. D y Maggs, R. P (1976). *Container ship turnaround times at UK ports*. Maritime Policy & Management, vol. 4(1): 3-19 · Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1080/03088837600000033](https://doi.org/10.1080/03088837600000033)
 430. Edmond, E. D y Maggs, R. P (1978). *How Useful Are Queue Models in Port Investment Decisions for Container Berths?*. Journal of the Operational Research Society, vol. 29(1978): 741–750. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1057/jors.1978.162](https://doi.org/10.1057/jors.1978.162)
 431. Egeblad, J.; Garavelli, C.; Lisi, L. y Pisinger, D. (2010). *Heuristic for container loading of furniture*. European Journal of Operational Research, vol. 200(3): 881-892. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.048>
 432. Eisenberg, R.; Stahlbock, R.; Voß S. y Steenken, D. (2003). *Sequencing and scheduling of movements in an automated container yard using double rail-mounted gantry cranes*. Working paper, University of Hamburg. Hamburgo (Alemania).
 433. Ekren, B.Y. y Heragu, S.S. (2011). *Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 19(7): 1640-1650. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.02.008>
 434. Ekren, B.Y. y Heragu, S.S., Krishnamurthy A. y Malmberg, C.J. (2013). *An approximate solution for semi-open queueing network model of an autonomous vehicle storage and retrieval system*. Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 10(1): 205-215. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/260662553_An_Approximate_Solution_for_Semi-Open_Queueing_Network_Model_of_an_Autonomous_Vehicle_Storage_and_Retrieval_System

-
435. Ekren, B.Y. y Heragu, S.S., Krishnamurthy A. y Malmberg, C.J. (2014). *Matrix-geometric solution for semi-open queuing network model of autonomous vehicle storage and retrieval system*, Computers & Industrial Engineering, vol. 68(1):78-86. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.002>
436. El Sheik, A.S.R.; Paul R.Y., Harding, A.S. y Balmer, D. W. (1987). *A microcomputer-based simulation study of a port*. The Journal of the Operational Research Society, Current Simulation Research (Agosto 1987), vol. 38(8): 673-681. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] https://www.jstor.org/stable/2582839?seq=1#page_scan_tab_contents
437. El Sheikh, A.A.R.; Paul, R.J.; Harding, A.S. y Balmer, D.W. (1987). *A microcomputer-based simulation study of a port*. Journal of the Operational Research Society vol. 38(8): 673–681. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] DOI: [10.1057/jors.1987.116](https://doi.org/10.1057/jors.1987.116)
438. Elentably, A. (2015). *Simulation of a Container Terminal and it's reflect on Port Economy*. Paper 27 of the Smart Rivers 2015 Congress (PIANC) 7-11 Septiembre 2015, Buenos Aires (Argentina). 8 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] http://www.pianc.org.ar/_stage/pdf/papers_sr2015/27_paper_Elentably_SAU_1.pdf
439. Eley, M. (2002). *Solving Container Loading Problems by Block Arrangement*. European Journal of Operational Research, vol. 141(2): 393–409. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00133-9. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/222570028_Solving_container_loading_problems_by_block_arrangement
440. Eley, M. (2003). *A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem*. OR Spectrum, vol. 25(1): 54–60. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] <https://link.springer.com/article/10.1007/s002910200113>
441. Elliott C. y Hudak P. (1997). *Functional reactive animation*. Proceedings of the ACM SIGPLAN - International Conference on Functional Programming (ICFP '97), 9-11 June 1997, Amsterdam (Holanda). Páginas: 163–173. Disponible en [fecha de acceso 21.11.2016] <http://conal.net/papers/icfp97/icfp97.pdf>
442. El-Naggar, M.E. (2010). *Application of queuing theory to the container terminal at Alexandria Port*. Journal of Soil Science and Environmental Management, vol. 1(4): 77-85, (ISSN 2141-2391). Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] http://www.academicjournals.org/article/article1380016152_El-Naggar..pdf

-
443. Eltawil, A. (2013). *A systematic approach to container terminal planning and operational decision making*. The International Maritime Transport & Logistic Conference (MARLOG 2) Sustainable Development of Suez Canal Region, 17 – 19 de Marzo de 2013, Alejandría (Egipto).
444. Elwany M.H.; Ali, I. y Abouelseoud, Y. (2013). *A heuristics-based solution to the continuous berth allocation and crane assignment problem*, Alexandria Engineering Journal, vol. 52(4): 671-677, diciembre de 2013. Disponible en [fecha de acceso 21.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/259143771_A_heuristics-based_solution_to_the_continuous_berth_allocation_and_crane_assignment_problem
445. Emanuelsen, K. y Thordvalsen, S. (2012). *Supply Chain Optimization in the LNG Business*. Master Thesis. Industrial Economics and Technology Management. NTNU Trondheim. Norwegian University of Science and Technology. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:626521/FULLTEXT01.pdf>
446. Emshoff, J. R., y Sisson, R.L. (1970). *Design and use of computer simulation models*. 319 páginas. London: ed. MacMillan. ISBN-10: 1114248495/ ISBN-13: 978-1114248496.
447. Eneyo, E.S. y Pannirselvam, G.P. (1998). *The Use of Simulation in Facility Layout Design: A Practical Consulting Experience*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Editado por D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson y M.S. Manivannan, pp: 1527-1532. Disponible en [fecha de acceso 30.01.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc98papers/208.PDF>
448. Engelen, S.; H. Meersman y E.V. Voorde (2006). *Using System Dynamics in Maritime Economics: an Endogenous Decision Model for Shipowners in the Dry Bulk Sector*. Maritime Policy and Management, vol. 33(2): 141-158. DOI: 10.1080/03088830600612807. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088830600612807>
449. Engelen, S.; Dullaert, W. y Vernimmen, B. (2009). *Market Efficiency within Dry Bulk Markets in the Short Run: a Multi-agent System Dynamics Nash Equilibrium*. Maritime Policy and Management, vol. 36(5): 385-396. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088830903187135>
450. Engineer, F.G.; Furman, K.C.; Nemhauser, G.L.; Savelsbergh, M.W.P. y Song, J.-H. (2012). *A branch price-and-cut algorithm for single-product maritime inventory routing*.

- Operations Research, vol. 60(1): 106-122. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.1110.0997?journalCode=opre>
451. Enríquez, F. (1968). *Problemática de la congestión portuaria*. Revista de Obras Públicas, vol. 115(I): 351-360. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1968/1968_tomoI_3037_03.pdf
452. Enríquez, F. (1991). *Multipurpose port terminals: Recommendations for planning and management*. UNCTAD Monographs on Port Management. United Nations Conference on Trade and Development Secretariat, Naciones Unidas, Nueva York (Estados Unidos), 67 páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] http://unctad.org/en/Docs/ship4949_en.pdf
453. EPPE (2012). Autores: Llorca, J.; González –Herreno, J.M. y Ametller, S. (2012). *ROM 2.1-2011: Obras de Atraque y Amarre. Tomos I y II. Serie de Recomendación de Obras Marítimas*. Organismo Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento de España). Tomo I (48 Páginas), Tomo II (468 Páginas). ISBN 978-84-99875-40-9 (Tomo I) 978-84-88975-78-2 (Obra Completa). Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%202.0-11.pdf>
454. Epting, F.; Probert, J.S. y Pittman, S.D. (2007). *Alternative strategies for construct elicitation: Experimenting with experience*. International Journal of Personal Construct Psychology, vol. 6(1): 79-98. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] DOI: [10.1080/08936039308404333](https://doi.org/10.1080/08936039308404333)
455. Epstein, J.M. (2009). *Modelling to contain pandemics*. Nature, vol. 460(6): 687-687 Disponible en [fecha de acceso <http://eaton.math.rpi.edu/CSUMS/Papers/Epidemic/epsteinpandemicmodeling.pdf>
456. Erichsen, S. (1981). *Simulation of receiving, storing and loading general cargo*. University of Michigan. Department of Naval Architecture and Marine Engineering. Michigan (Estados UNidos). 133 Páginas.
457. Erichsen, J.C. y Røstad, L.D. (2012). *Investments in the LNG Value Chain: A Multistage Stochastic Optimization Model focusing on Floating Liquefaction Units*. Norwegian University of Science and Technology. Department of Industrial Economics and Technology Management. Master Thesis. 164 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:626528/FULLTEXT01.pdf>
458. Etkin, S. (1999). *Estimating cleanup costs for oil spills*. Proceedings of the 1999 International Oil Spill Conference (IOSC'99), 8-11 de Marzo de 1999, Seattle

- (Washington, Estados Unidos),. Section M1B: Spill Funding, pp: 35–40. DOI: [10.7901/2169-3358-1999-1-35](https://doi.org/10.7901/2169-3358-1999-1-35) Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://ioscproceedings.org/doi/pdf/10.7901/2169-3358-1999-1-35>
459. Etkin, S. (2000). *Worldwide analysis of marine oil spill cleanup cost factors*. Proceedings 23rd Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar (AMOP'2000), Vancouver (Canadá). 14-16 de junio de 2000. pp: 161–174. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] http://www.environmental-research.com/publications/pdf/spill_costs/paper7.pdf
460. Everett, J. L.; Hax, A. C.; Lewinson, V. A. y Nutts, D. (1972). *Optimization of a Fleet of Large Tankers and Bulkers: A Linear Programming Approach*. Marine Technology, October 1972, pp: 430-438. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=f8e95b4f-8627-4185-b1b6-a8c15cf1355e>
461. Evers, J.J.M. y Koppers, S.A.J. (1996). *Automated Guided Vehicle traffic control at a container terminal*. Transportation Research, vol. 30(1): 21-34. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0965856495000119>
462. EXTENDSIM (2016). *EXTENDSIM: History*. Image That Inc. @ Extendsim. San José, California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 13.11.2016] http://www.extendsim.com/prods_history.html.
463. EXTENDSIM (2017). *Updaters for earlier versions of ExtendSim*. Image That Inc. @ Extendsim. San José, California, Estados Unidos. Disponible en [fecha de último acceso 10.10.2017]. <https://www.extendsim.com/support/downloads/updates>
464. Fagerholt K.; Hvattum, L.M.; Johnsen, T.A.V.; y Korsvik J.E. (2011). *Routing and scheduling in project shipping*. Annals of Operations Research (Mayo-2011). Publicación online, más tarde publicado en Fagerholt *et al.* (2013). Disponible en [fecha de acceso 20.12.2016] <http://paperity.org/p/11991554/routing-and-scheduling-in-project-shipping>
<http://paperity.org/p/11991554/routing-and-scheduling-in-project-shipping>
465. Fagerholt, K. (1999). *Optimal fleet design in a ship routing problem*. International Transactions in Operational Research, vol. 6(5): 453-464. Disponible en [fecha de acceso 24.11.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-3995.1999.tb00167.x/references>

466. Fagerholt, K. (2004a). *A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling - Experience and future research*. Decision Support Systems, vol. 37(1): 35-47. DOI: 10.1016/S0167-9236(02)00193-8. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016]. [https://www.researchgate.net/publication/222659256_A_computer-based_decision_support_system_for_vessel_fleet_scheduling - Experience and future research](https://www.researchgate.net/publication/222659256_A_computer-based_decision_support_system_for_vessel_fleet_scheduling_-_Experience_and_future_research)
467. Fagerholt, K. (2004b). *Designing optimal routes in a liner shipping problem*. Maritime Policy & Management, vol. 31(4): 259-268. DOI: 10.1080/0308883042000259819. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/248989186_Designing_optimal_routes_in_a_liner_shipping_problem
468. Fagerholt, K. y Lindstad, H. (2007). *TurboRouter: An interactive optimisation-based decision support system for ship routing and scheduling*. Maritime Economics and Logistics, vol. 9(3): 214-233. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100180 · Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016]. https://www.researchgate.net/publication/5223645_TurboRouter_An_Interactive_Optimisation-Based_Decision_Support_System_for_Ship_Routing_and_Scheduling
469. Fagerholt, K. y Ronen, D. (2013). *Bulk ship routing and scheduling: solving practical problems may provide better results*. Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research, vol. 40(1): 48-64 (2013). Disponible en [fecha de último acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/262003981_Bulk_ship_routing_and_scheduling_Solving_practical_problems_may_provide_better_results
470. Fagerholt, K.; Hvattum, L.M.; Johnsen, T. A. V. y Korsvik, J.E. (2013). *Routing and scheduling in project shipping*. Annals of Operations Research vol. 207(1): 67-81. DOI: 10.1007/s10479-011-0888-1. Disponible en [fecha de último acceso el 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/238487232_Routing_and_scheduling_in_project_shipping
471. Faghri, A. y Wahed, M.A. (2002). *Development of a Computer Simulation Model to Optimize the Operations of a Multipurpose Seaport*. Delaware Center for Transportation, Department of Civil and Environmental Engineer. University of Delaware (Delaware, Estados Unidos). 147 Páginas Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] <http://sites.udel.edu/dct/files/2013/10/Rpt.-135-Development-of-a-Computer-Simulation-Model-to-Optimize-the-Operations-of-a-Multipurpose-Seaport-z8dun9.pdf>

-
472. Fan, L.; Low, M.Y.H.; Ying, H.S.; Jing, H.W.; Min, Z. y Aye, W.C. (2010). *Stowage Planning of Large Containership with Tradeoff between Crane Workload Balance and Ship Stability*. Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2010 – Volumen III. (2010). 7 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.10.2016] http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010_pp1537-1543.pdf
473. Fang, Z.; Qi, Y.; Hao, J. y Huang, J. (2014). *Agent-Based Simulation Analysis on the Effect of an LNG Terminal on a Port Transport System*. 14th COTA International Conference of Transportation Professionals. American Society of Civil Engineers (ASCE) Library. Disponible en [fecha de acceso 15.10.2016] <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784413623.014#sthash.Z75wzDuQ.dpuf>
474. Fanslau, T. y Bortfeldt, A. (2010). *A Tree Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. INFORMS Journal on Computing, vol. 22(2): 222–235. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <https://www.fernuni-hagen.de/wirtschaftswissenschaft/download/beitraege/db426.pdf>
475. Farmer, J.D. y Foley, D. (2009). *The economy needs agent-based modeling*. Nature: The Weekly Journal of Science, vol. 460 (7256): 685–686. . Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.nature.com/nature/journal/v460/n7256/full/460685a.html>
476. FICO (2009): *Mosel: An overview*. Fair Isaac Corporation. (California, Estados Unidos) 25 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://www.fico.com/en/node/8140?file=5017>
477. FICO (2013): *Getting Started with MOSEL*. Fair Isaac Corporation. San Jose (California, Estados Unidos) Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] http://www.maths.ed.ac.uk/Reino Unido/hall/Xpress/FICO_Docs/mosel/mosel_ug/dhtml/moselugintro.html
478. Fiorello, D.; Fermi, F. y Bielanska, D. (2010). *The ASTRA Model for Strategic Assessment of transport Policies*. System Dynamics Review, vol. 26(3): 283-290. Disponible en (fecha de acceso 26.10.2016) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sdr.452/abstract>
479. Fischer, K. y Khun, N. (1993). *A DAI approach to Modelling the Transport Domain*. © Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Int. DFKI – Research Report RR 93-25. 91 páginas. Disponible en (fecha de acceso 26.10.2016) http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/3697/pdf/RR_93_25.pdf

-
480. Fishbone, L.G. y Abilock, H. (1981). *Markal, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version*. International Journal of Energy Research, vol. 5(4): 353-375. Disponible en [fecha de acceso 22.11.2016] DOI: [10.1002/er.4440050406](https://doi.org/10.1002/er.4440050406)
481. Fisher, M. L. y Rosenwein, M. B. (1989). *An Interactive Optimization System for Bulk-Cargo Ship Scheduling*. Naval Research Logistics, vol. 36(1): 27-42. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1002/1520-6750\(198902\)36:1<27::AID-NAV3220360103>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1520-6750(198902)36:1<27::AID-NAV3220360103>3.0.CO;2-0)
482. Fisher L.M. (2005). *The Prophet of Unintended Consequences*. Digital strategy-business. Recurso en línea. Disponible en (fecha de acceso 26.11.2016) <http://www.strategy-business.com/article/05308?pg=all>
483. Fishman, G. S. (1973). *Concepts and methods in discrete event digital simulation*. New York: John Wiley & Sons Inc (5 de septiembre de 1973). 400 páginas. ISBN-10: 0471261556 / ISBN-13: 978-0471261551.
484. Fishman, G. S. (1978). *Principles of discrete event simulation*. Editado por John Wiley & Sons Inc el 4 de abril de 1979. 534 páginas. ISBN-10: 0471043958 / ISBN-13: 978-0471043959.
485. Flatberg, T.; Haavardtun, J.; Kloster, O- y Lokketangen, A. (2000). *Combining exact and heuristic methods for solving a vessel routing problem with inventory constraints and time windows*. Ricerca Operativa, vol. 29(91): 55-68. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <https://www.sintef.no/en/publications/publication/?pubid=CRISTin+935034>
486. Fleming, M.; Huynh, N. y Xie, Y. (2013). *Agent-Based Simulation Tool for Evaluating Pooled Queue Performance at Marine Container Terminals*. Journal of the Transportation Research Board - Marine Transportation and Terminal Operations 2013, vol. 2330(2013): 103-112. ISBN: 9780309263313. Disponible en [fecha de acceso 26.04.2017] <http://docs.trb.org/prp/13-2936.pdf>
487. FLEXIM (2016a). *Flexim Simulation* ©: Homepage. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016] <https://www.flexsim.com/>.
488. FLEXIM (2016b). *Flexim Simulation* ©: History. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016] <https://www.flexsim.com/company/>.

-
489. FLEXIM (2016c). *Flexim CT. Container Terminal Library*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016] <https://www.flexsim.com/company>.
490. FLEXIM (2017). *Flexim 2015; New Features*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos) . Disponible en [fecha de acceso 16.06.2017] <https://www.flexsim.com/es/flexsim-2017-scripting-process-flow-improvements-more/>
491. FLEXTERM (2016), *FLEXTERM: FLEXIM Container terminal*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016]. <http://www.flexsim.com.mx/flexsim-ct-flexterm> y <http://www.flexterm.com/>
492. FLEXTERM (2017). *FLEXTERM: Press Releases*. FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem (Utah, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017]: <http://www.flexterm.com/support/release-notes>
493. Flood, M. M. (1954). *Application of Transportation Theory to Scheduling a Military Tanker Fleet*. Operations Research, vol. 2(1): 150-162. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/opre.2.2.150>
494. Fodstad, M.; Stremersch, G.; Hecq, S. y Lium A.G. (2010). *LNGScheduler: a rich model for coordinating vessel routing, inventories and trade in the liquefied natural gas supply chain*. The Journal of Energy Markets, vol. 3(4): 1-34. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/249968121_LNGScheduler_A_rich_model_for_coordinating_vessel_routing_inventories_and_trade_in_the_LNG_supply_chain
495. Folcik, V. A., An, G.C. y Orosz, C.G. (2007). *The Basic Immune Simulator: An Agent-Based Model to Study the Interactions between Innate and Adaptive Immunity*. Theoretical Biology and Medical Modelling, vol. 4(39): 1-18. Disponible en [fecha de acceso 12.03.2017] link.springer.com/content/pdf/10.1186/1742-4682-4-39.pdf
496. Fonseca i Casas, P. y Casanovas, J. (2009). *JPSS, an open source GPSS framework to teach simulation*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (Editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin y R. G. Ingalls). Páginas: 256-267. Disponible en [fecha de acceso 12.06.2017]. <http://www.informs-sim.org/wsc09papers/022.pdf>.

-
497. Forrester, J.W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press. 479 Páginas. ISBN-10:0262060035, ISBN-13:978-0262060035.
498. Forrester, J.W. (1969). *Urban Dynamics*. MIT Press. 300 Páginas. ISBN-10:0262060264, ISBN-13:978-0262060264.
499. Forrester, J.W. (1970). *A World Dynamics Model: Introductory Exercise*. MIT D-memos 1348, 1353-5, 1357&8 y 1360.
500. Forrester, J.W. (1971). *World Dynamics*. Cambridge, Mass. Wright-Allen Press (consultado en edición 1973) (2ª edición revisada de 1979). ISBN 0262560186, ISBN13: 9780262560184). 144 páginas.
501. Forrester, J.W.: (1975). *Collected Papers of Jay Forrester*. Pegasus Communications (ISBN 1883823374, ISBN13: 978-1883823375) 284 páginas.
502. Forrester, J.W.: (1996). *The beginning of System Dynamics*. Conferencia en la reunión internacional de la System Dynamic Society de 1989. Editado por Forrester en 1996 y Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] en <http://web.mit.edu/sysdyn/sd-intro/D-4165-1.pdf>
503. Forsythe, G. E.; Malcolm, M. A.; y Moler, C. B. (1977). *Computer Methods for Mathematical Computations*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977. 270 Páginas. ISBN-10: 0131653326 / ISBN-13: 978-0131653320
504. Foss, B.A. y Halvorsen, I.J. (2009). *Dynamic optimization of the LNG value chain*. Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium. Editores: H. Alfadala, G.V. Rex Reklaitis y M.M. El-Halwagi © 2009 Elsevier B.V. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://www.ntnu.edu/documents/139834/7683624/conf-101.pdf>
505. Fosters, F. y A. Bortfeldt. (2012). *A tree search procedure for the container relocation problem*. Computers and Operations Research, vol. 39(2): 299-309. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/220469692_A_tree_search_procedure_for_the_container_relocation_problem
506. Francis, R.L. y White, J.A. (1974). *Facility layout and allocation – An analytical Approach*. Prentice-Hall, Englewood Ciffs, NJ. 1974. 592 Páginas. ISBN-10: 0132992310 / ISBN-13: 978-0132992312.

-
507. Frankel, E.; Wilmes, P.G. y Chelst. K.G. (1973). *Simulation of Multipurpose Port and Multiport Offshore Facilities*, Offshore Technology Conference, 29 de Abril - 2 de Mayo de 1973, Houston, Texas (Estados Unidos). Publicado por Offshore Technology Conference (ISBN: 978-1-55563-659-3).
508. Frankel, E.; Golden. G. y Wilmes, P.G. (1974a). *Port Design and Analysis Methodology* Massachusetts Institute of Technology – Sea Grant Program. Report. MITSG 74-31 MIT IX 74-331-NTO NOAA-75011403 (330 páginas).
509. Frankel, E.; Golden. G. y Wilmes, P.G. (1974b). *Appendix Port Design and Analysis Methodology*. Massachusetts Institute of Technology – Sea Grant Program. MITSG 74-31 MIT IX 74-331-NTO NOAA-75011403 (148 páginas).
510. Frankel, E. (1987). *Port Planning and Development*. John Wiley & Sons Inc (30 de abril de 1987). ISBN-10: 0471837083 y ISBN-13: 978-0471837084. (822 Páginas).
511. Franta, W. R. (1977). *The process view of simulation*. New York: Elsevier Science Ltd (1 de septiembre de 1977). 256 páginas ISBN-10: 0444002235 / ISBN-13: 978-0444002235.
512. Fratar, T.J.; Goodman, A.S. y Brant, A. E. (1960). *Prediction of Maximum Practical Berth Occupancy*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbours Division. American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 86(2): 69-78.
513. Frazelle. E.H. (2016). *World-Class Warehousing and Material Handling, 2nd Edition*. McGraw Hill Professional. ISBN 0071842837, 9780071842839. (256 páginas).
514. Frazer, J. R. (1975). *Business decision simulation: a time sharing approach*. Reston VA: Reston Publishing. (1 de diciembre de 1975). ISBN-10: 0879091134 / ISBN-13: 978-0879091132. (154 páginas)
515. Frías-Martínez, E.; Williamson, G. y Frías-Martínez, V. (2011) *An Agent-Based Model of Epidemic Spread using Human Mobility and Social Network Information*. Proceedings of the Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT) y 2011 IEEE 3rd International Conference on Social Computing (SocialCom), 8 páginas. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.vanessafriasmartinez.org/uploads/socialcom2011.pdf>
516. Fu, M.M. (2011a). *Port and Economy Relationship Analysis by System Dynamics*. International Conference on Transportation Engineering (ICTE) (pp: 162-167). Chengdu, China: American Society of Civil Engineers. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41184%28419%2928>

-
517. Fu, M.M. (2011b). *A Study On Port-Regional Economy System Based On System Dynamics*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=1119360308969767>
518. Fukunari, M. y Malmborg C. J. (2009). *A network queuing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems*. European Journal of Operational Research, vol. 193(1): 152–167. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.049>
519. Furman, K.C.; Song, J.-H.; Kocis, G.R.; McDonald, M.K. y Warrick, P.H. (2011). *Feedstock routing in the ExxonMobil downstream sector*. Interfaces, vol. 41(2): 149–163. Disponible en [fecha de acceso 07.11.2016] <http://www.jstor.org/stable/23016240>
520. Fusco, P.M.; Sauri, S. y Spuch, B. (2010). *Quality indicators and capacity calculation for Ro-Ro terminals*. Transportation and Technology, vol. 33(8): 695–717. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03081060.2010.527179>
521. Gademann, A.J.R.M. y van de Velde S.L. (2000)- *Positioning automated guided vehicles in a loop layout*. European Journal of Operational Research vol. 127(3): 565–573. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/220290274_Positioning_automated_guided_vehicles_in_a_loop_layout
522. Galea, E.R. y Owen, M: (1994). *Predicting the Evacuation Performance of Mass Transport Vehicles. Fire Safety on Ships. Developments into the 21st Century*. Proceedings of the Institute of Marine Engineers, Science and Technology Conference (IMarE'94), vol. 106(2): 239–247, Londres (Reino Unido). ISBN 0-907206-57-3. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/Reino Unido/fire/pub.asp>
523. Galea, E.R.; Gwynne, S.; Blackshields, D.; Lawrence, P. y Filippidis, L. (2001). *Predicting the evacuation performance of passenger ships using computer simulation*. Proceedings of the 9th International Fire Science and Engineering Conference: Interflam'01, vol. 2(1): 853–864, Edimburgo (Escocia), 17–19 de Septiembre de 2001, publicado por Interscience Communications Ltd, Londres (Reino Unido), ISBN 0 95323129 1 (vol2). Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.uk/Reino Unido/fire/pub.asp>
524. Galea E.R.; Filippidis L.; Gwynne S.; Lawrence, P.J. y Blackshields, D. (2002a). *Predicting the Performance of Passenger Ships using Computer Simulation*. Proceedings of the Fire Safety and Survivability, Applied Vehicle Technology (AVT) Panel Symposium, NATO Research and Technology Organisation, Aalborg (Dinamarca), 23–

- 26 Septiembre de 2002, RTO-MP-092, (AVT-088), CD, paper 33, 14 páginas, publicado en Noviembre de 2003. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
525. Galea, E.R.; Filippidis, L.; Gwynne, S.; Lawrence, P.; Sharp, G. y Blackshields, D. (2002b). The Development of an Advanced Ship Evacuation Simulation Software Product and Associated Large Scale Testing Facility for the Collection of Human Shipboard Behaviour Data. Proceedings of the International Conference on Human Factors in Ship Design and Operation, The Royal Institution of Naval Architects, Londres (Reino Unido), pp: 37-50. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
526. Galea, E.R.; Gwynne, S.; Lawrence, P.; Blackshields, D.; Ewer, J.; Wang, N.; Hurst, N. y Mawhinney, N. (2003a). *Fire Safety Engineering and Ship Design Using Advanced Fire and Evacuation Simulation*. Proceedings of the 1st International Conference – Fire on Ships: Prevention, Detection and Control on Ships and Offshore Structures, 11-12 de marzo de 2003 Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
527. Galea, E R; Gwynne, S.; Lawrence, P.; Blackshields, D.; Ewer, J.; Wang, N.; Hurst, N. y Mawhinney, N. (2003b). *The Application of Fire and Evacuation Simulation in Ship Design*. Proceedings of the 2nd International EuroConference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries - COMPIT 2003, Hamburgo (Alemania), pp: 55-69. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
528. Galea E.R.; Lawrence, P.; Gwynne, S.; Filippidis, L.; Blackshields, D.; Sharp, G.; Hurst, N.; Wang, Z., y Ewer J. (2003c). *Simulating Ship evacuation under fire conditions*. Proceedings of the 2nd International Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference, (Editor: E.R.Galea), CMS Press, Greenwich, (Londres), ISBN 1904521088, pp: 159-172, Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
529. Galea, E.R.; Lawrence, P.; Gwynne, S.; Sharp, G.; Hurst, N.; Wang, Z. y Ewer, J. (2004). *Integrated fire and evacuation in maritime environments*. Proceedings of the 2nd International Maritime Safety Conference on Design for Safety, Sakai (Japon), Publicado por Ship and Ocean Foundation, 27-30 de Octubre de 2004, pp: 161-170. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>.
530. Galea, E.R.; Deere, S.; Brown, R., y Filippidis, L. (2012a). *An Evacuation Validation Data Set for Large Passenger Ships*. Proceedings of the 6th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics. 6-8 de Junio de 2012, Springer, New York,

- (Estados Unidos). pp:109-124, ISBN 978-3-319-02446-2. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] [DOI:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02447-9_7](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02447-9_7), 2014
531. Galea, E.R.; Lohrmann, P.; Brown, R.; Deere, S. y Filippidis, L. (2012b). *Understanding human performance in ship evacuation*. The Journal of Ocean Technology, Extreme Survival, vol. 7(3): 1-7. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://fseg.gre.ac.Reino Unido/fire/pub.asp>
532. Galvão Ramos, A.; Oliveira, J.F. y Lopes, M.P. (2014). *A physical packing sequence algorithm for the container loading problem with static mechanical equilibrium conditions*. International Transactions in Operational Research, vol. 23 (1-2),: 215-238. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/itor.12124/full>
533. Gambardella, L.M.; Bontempi, G.; Taillard, E.; Romanengo, D.; Raso, G. y Piermari P. (1996). *Simulation and forecasting in intermodal container terminal*. Simulation in Industry, 8th European Simulation Symposium, Genoa, Italy (1996). Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2425555_Simulation_And_Forecasting_In_Intermodal_Container_Terminal
534. Gambardella, L.; Rizzoli, A. y Zaffalon, M. (1998). *Simulation and planning of an intermodal container terminal*. Simulation 71(2): 107–116. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://people.idsia.ch/~luca/tr-idsia-41-98.pdf>
535. Gambardella L. M. y Rizzoli A. E. (2000): *The role of simulation and optimization in intermodal container terminals*. Working paper, Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale, Manno-Lugano, Switzerland (2000). Disponible en [fecha de acceso 15.09.2016] <http://www.idsia.ch/luca/abstracts/papers/ess2000.pdf>
536. Gambardella, L.M., Mastrolilli, M., Rizzoli A.E. y Zaffalon, M. (2001). *An optimization methodology for intermodal terminal management*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 12(5-6): 521-534. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/200058865_An_optimization_methodology_f_or_intermodal_terminal_management
537. GAMS (2017). *An Introduction to GAMS*. © GAMS Development Corporation, Washington DC (Estados Unidos) Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] <https://www.gams.com/>

538. Gao, C.; Zhang, R.; Du, Y. y Chen, Q. (2010) *A proactive and reactive framework for berth allocation with uncertainties*. Advanced Management Science (ICAMS), 2010 IEEE International Conference vol. 3(2010): 144 –149. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/251946778_A_proactive_and_reactive_framework_for_berth_allocation_with_uncertainties
539. Gao, S. (2012). *Research On The Regional Development Of Dalian Port Based On System Dynamics*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335455484>.
540. García, A.; García, I.; y Pérez, J.L. (2006). *Modelo y análisis de un puerto seco mediante simulación*. X Congreso de Ingeniería de Organización. Valencia 7 y 8 de Septiembre de 2006. 7 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 02/11/2014] http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2006/gestion_produccion/000177_final.pdf
541. Garrison, W.J. (1991a). *NETWORK II.5 – Users Manual*. CACI Products Co. La Jolla California (Estados Unidos).
542. Garrison, W.J. (1991b). *NETWORK II.5, LANNET II.5 and COMNET II.5*. Proceedings of the 23th Winter Simulation Conference, Phoenix, 8-11 de diciembre de 1991, Arizona, (Estados Unidos). Editado por L. Nelson, W.D. Kelton y G.M. Clark. Páginas: 72-76. Disponible en [fecha de acceso 24.06.2017] http://www.informs-sim.org/wsc91papers/1991_0011.pdf
543. Garro, A.; Monaco, M.F.; Russo, W.; Sammarra, M. y Sorrentino, G. (2015). *Agent-based simulation for the evaluation of a new dispatching model for the straddle carrier pooling problem*. Simulation, vol. 91(2): 181-202. Disponible en [fecha de acceso 24.02.2017] <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0037549714566699>
544. Gehring, H., y Bortfeldt, A. (1997). *A Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. International Transactions in Operational Research vol. 4(5/6): 401–418. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969601697000336> y http://www.econbiz.de/archiv/ha/fuha/winformatik/algorithm_container_problem.pdf
545. Gehring, H. y Bortfeldt, A. (2002). *A Parallel Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. International Transactions in Operational Research, vol. 9(4): 497–511. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 20.02.2017]

- https://www.researchgate.net/publication/227625364_A_Parallel_Genetic_Algorithm_for_Solving_the_Container>Loading_Problem
546. Gehring, H.; Bortfeldt, A. y Mack, D. (2003). *A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem*. *Parallel Computing*, vol. 29(5): 641–662. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167819103000474>
547. Gelenbe, E. y Guennouni, H. (1991). *FlexSim: A flexible manufacturing system simulator*. *European Journal of Operational Research*, vol. 53(2): 149–165. Disponible en [fecha de acceso 26.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/4941392_FLEXSIM_A_flexible_manufacturing_system_simulator
548. George, J. A. y Robinson, D. F. (1980). *A Heuristic for Packing Boxes into a Container*. *Computers and Operations Research*, vol. 7(3): 147-156. Disponible en [fecha de acceso 26.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548\(80\)90001-5](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(80)90001-5)
549. Gharehgozli, A.H.; Roy, D. y de Koster, R. (2014). *Sea Container Terminals: New Technologies, OR models, and Emerging Research Areas*. ERIM Report Series Reference No. ERS-2014-009-LIS. 49 páginas. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2469175
550. Gharehgozi, A.H.; Roy, D. y de Koster, R. (2015). *Sea container terminals: New technologies and OR models*. *Maritime Economics & Logistics* 18(2): 103-140. doi:10.1057/mel.2015.3. Disponible en [fecha de acceso 07.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/276167788_Sea_container_terminals_New_technologies_and_OR_models
551. Gharehgozli, A.H.; Roy, D. y de Koster, R. (2016). *Sea Container Terminals: New Technologies, OR models*. *Maritime Economics & Logistics*, vol. 18(2): 103–140. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <https://link.springer.com/article/10.1057/mel.2015.3>
552. Giallombardo, G.; Moccia, L.; Salani, M., y Vacca; I. (2008). *The tactical berth allocation problem with quay crane assignment and transshipment-related quadratic yard costs*. *Proceedings of the European Transport Conference 2008 (ETC'08)*, pp: 1–27. (2008). Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] https://infoscience.epfl.ch/record/138850/files/CT_ETC_08.pdf

-
553. Giallombardo, G.; Moccia, L. y Salani, M. (2010). *Modeling and Solving the Tactical Berth Allocation Problem*. *Transportation Research Part B Methodological*, vol. 44(2): 232-245. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261509000824>
554. Gibson (2016). *Gas Carrier Register 2016*. Gibson Shipbrokers © 2016. ISBN 978-0-9935533-1-8.
555. Giemisch, P. y Jellinghaus, A. (2003). *Organization models for the containership stowage problem*. Proceedings of the Annual international conference of the German Operations Research Society (OR 2003), 3–5 de Septiembre de 2003, Heidelberg (Alemania). Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.5239&rep=rep1&type=pdf>
556. Giralt, G.; Chatila, R. y Vaisset, M. (1983). *An integrated navigation and motion control system for autonomous multisensory mobile robots*. *Robotics Research*, pp: 191-214 (editores Brady y Paul), Massachusetts Institute of Technology. MIT Press. Cambridge, (Massachusetts, Estados Unidos). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: [10.1007/978-1-4613-8997-2_31](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8997-2_31)
557. Glen, I.F. y Galea, E.R. (2001). *Ship Evacuation Simulation: Challenges and Solutions*. *SNAME Transactions*, vol. 109, año 2001, pp: 121-139. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=6fa92186-e538-4f8e-94ab-3da390fa628e>
558. Globe, J. (1990). *SIMFACTORY Course Note*. CACI Products Co. La Jolla, California, (Estados Unidos).
559. Globe, J. (1991). *Introduction to SIMFACTORY II-5*. CACI Products Co. La Jolla (California, Estados Unidos). Proceedings of the 23th Winter Simulation Conference, 8-11 de diciembre de 1991, Phoenix (Arizona, Estados Unidos). Editado por L. Nelson, W.D. Kelton y G.M. Clark. pp: 77-80. Disponible en [fecha de acceso 24.06.2017] http://informs-sim.org/wsc91papers/1991_0012.pdf
560. Globe, J. (1997). *MODSIM III- A tutorial*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference – Año 1999. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Páginas 601 – 605. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0601.PDF>.

-
561. Gökkus, Ü. (1995). *Application of queuing theory on the design of fishing harbors*. Transactions on the Built Environment – Marine Technology and Transportation, vol. 12(1995): 711-719. ISSN 1743-3509. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/MT95/MT95083FU.pdf>
562. Goldberg, A. (1983). *Smalltalk-80: The Interactive Programming Environment*. Editado por Addison-Wesley (December 1983). 516 páginas. ISBN-13: 978-0201113723.
563. Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA. 1ª edition (11 de enero 1989) 432 páginas. ISBN-10: 0201157675 / ISBN-13: 978-0201157673.
564. Goldsman, D.; Nance, R. E. y Wilson, J.R. (2009). *A brief history of simulation*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (Editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin, and R. G. Ingalls) pp: 310-313. Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc09papers/028.pdf>.
565. Goldsman, D.; Nance, R. E. y Wilson, J.R. (2010). *A brief history of simulation revisited*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, and E. Yücesan). pp: 567- 574. . Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/051.pdf>
566. Goldsman, D. y Nelson, B.L. (1994). *Ranking, selection and multiple comparisons in computer simulation*. Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference. Lake Buena Vista (Florida, Estados Unidos). Editado por J.D.Tew, S. Manivannan, D. Sadowski, y A.F. Seila. pp: 192-199. Disponible en [fecha de último acceso el 05.11.2017] http://informs-sim.org/wsc94papers/1994_0026.pdf
567. González, E.; Pinte, K. y Van der Water, S. (2013). *Object-oriented Reactive Programming is Not Reactive Object-oriented Programming*. Universidad de Bruselas. Bruselas (Bélgica). Disponible en [fecha de acceso 21.11.2016] <http://soft.vub.ac.be/Publications/2013/vub-soft-tr-13-16.pdf>
568. González, J.M. (2006). *ROM 2.1: Obras de Atraque y Amarre. Capítulo 3 (Documento de trabajo predefinitivo de Julio 2006). Criterios de Proyecto*. EROM2. Documento Interno de trabajo de la Comisión redactora de la ROM 2.1: Obras de Atraque y Amarre. Ente Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento del Gobierno de España). 65 Páginas.
569. Goodchild, A. V. y Daganzo, C. F. (2005). *Crane double cycling in container ports: Effect on Ship Dwell Time*". Institute of Transportation Studies. University of California at

- Berkeley. Research report: UCB-ITS-RR-2005-5ISSN 0192 4095. Disponible en [fecha de acceso en 07.02.2017] <http://www.its.berkeley.edu/sites/default/files/publications/UCB/2005/RR/UCB-ITS-RR-2005-5.pdf>
570. Goodchild, A. V. y Daganzo, C. F. (2006). *Double-cycling strategies for container ships and their effect on ship loading and unloading operations*. Transportation Science, vol. 40(4): 473–483. Disponible en [fecha de acceso en 07.02.2017] [doi>10.1287/trsc.1060.0148](https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0148)
571. Goodchild, A. V. y Daganzo, C. F. (2007). *Crane double cycling in container ports: planning methods and evaluation*. Transportation Research Part B, vol. 41(8): 875–89. Disponible en [fecha de acceso en 07.02.2017] <https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.02.006>
572. Goodchild, A. y Mohan, K. (2008). *The clean trucks program: Evaluation of policy impacts on marine terminal operations*. Maritime Economics and Logistics, vol. 10(4): 393–408. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1057/mel.2008.13](https://doi.org/10.1057/mel.2008.13)
573. Gordon, G. (1960). *A general purpose systems simulator*. (Manual no publicado.) White Plains, N.Y.: IBM. Corp. ASDD Commercial Dept.
574. Gordon, G. (1961). *A general purpose systems simulation program*. Proceeding AFIPS'61 (Eastern), Eastern Joint Computer Conference: Computers - key to total systems control, pp: 87-104, 12-14 diciembre de 1961. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [doi>10.1145/1460764.1460768](https://doi.org/10.1145/1460764.1460768)
575. Gordon, W.T. y Newell, G.F. (1967). *Closed Queuing Systems with Exponential Servers*. Operations Research, vol. 15(2): 252-265. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] <https://doi.org/10.1287/opre.15.2.254>
576. Gordon, G. (1969). *System simulation*. (2ª edición de junio 1978). Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 324 páginas. ISBN-10: 0138817979 / ISBN-13: 978-0138817978.
577. Gordon, G. (1975). *The application of GPSS V to discrete system simulation*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. (Julio 1975) 336 páginas. ISBN-10: 0130390577 / ISBN-13: 978013039057.
578. Gordon, G. (1978). *System simulation - 2nd edition*. Prentice-Hall Inc, New Jersey (Estados Unidos). 324 Páginas. ISBN-10: 0138817979 y ISBN-13: 978-0138817978.
579. Gorman, M.; Clarke, J.-P.; Gharehgozli, A.; Hewitt, M.; De Koster, R. y Roy, D. (2014) *State of the Practice: A Review of the Application of OR/MS in Freight Transportation*. .

- Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] Interfaces 44(6): 535-554.
<https://doi.org/10.1287/inte.2014.0772>
580. Gosasang, V.; Chandraprakaikul, W. y Kiattisin, S. (2010). *An Application of Neural Networks for Forecasting Container Throughput at Bangkok Port*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Volumen I. Londres (Reino Unido). ISBN: 978-988-17012-9-9. ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online). Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/45534370_An_Application_of_Neural_Networks_for_Forecasting_Container_Throughput_at_Bangkok_Port
581. Gransberg, D.D. y Basilloto, P.J. (1998). *Cost engineering optimum seaport capacity*. Cost Engineering, vol. 40(9): 28-32. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://works.bepress.com/douglas_gransberg/6/
582. Gray, R. (1982). *Behavioural approaches to freight transport modal choice*. Transport Reviews, vol. 2(2): 161-184. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] DOI: [10.1080/01441648208716491](https://doi.org/10.1080/01441648208716491)
583. Greenberg, S. (1972). *GPSS Primer*. New York: John Wiley & Sons Inc. (1ª Edición 14 de junio de 1972). 344 páginas. ISBN-10: 0471324906 ISBN-13: 978-0471324904.
584. Gregor, D. (2013a). *Generic Programming*. The Trustees of Indiana University. Indiana (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://www.generic-programming.org/>
585. Gregor, D. (2013b). *Generic Programming: Libraries*. The Trustees of Indiana University. Indiana (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://www.generic-programming.org/software/libraries.php>
586. Greif, M. (1991). *The Visual Factory: Building Participation Through Shared Information*. Productivity Press, Cambridge, Mass. (Febrero 1991). ISBN-13: 978-0915299676 / ISBN-10: 0915299674. 306 Páginas.
587. Griffin, A. F. y Stanish, C. (2007). *An Agent-Based Model of Prehistoric Settlement Patterns and Political Consolidation in the Lake Titicaca Basin of Peru and Bolivia, Structure and Dynamics*. eJournal of Anthropological and Related Sciences, vol. 2(2): 1-47. Disponible en [fecha de acceso 22.03.2017] <http://www.sscnet.ucla.edu/anthro/faculty/stanish/publications/Stanish%202007%20An%20agent-based%20model%20of%20prehistoric%20settlement%20patterns.pdf>

-
588. Griffiths, J. D. (1976). *Optimal handling capacity at a berth*. Maritime Policy and Management, vol. 3(3): 163-167. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1080/03088837600000004](https://doi.org/10.1080/03088837600000004)
589. Grigalunas, T.A.; Opaluch, J.J.; French, D.; Reed, M. y Knauss, D. (1988). *A natural resource damage assessment model for coastal and marine environments*. GeoJournal vol. 16(3): 315–321. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: [10.1007/BF00270261](https://doi.org/10.1007/BF00270261)
590. Grønhaug, R. y Christiansen, M. (2009). *Supply Chain Optimization for the Liquefied Natural Gas Business*. Innovations in Distribution Logistics. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Berlin Heidelberg. Editado por Nunen, J.A.E.E., Speranza, M.G. y Bertazzi, L. Páginas 195- 218. Disponible en [fecha de último acceso 15.11.2016] DOI: [10.1007/978-3-540-92944-4_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92944-4_10)
591. Grønhaug, R.; Christiansen, M.; Desaulniers, G. y Desrosiers, J. (2010). *A branch-and-price method for a liquefied natural gas inventory routing problem*. Transportation Science, vol. 44(3): 400-415. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1100.0317>.
592. Grosman, P.D.; Jaeger, J.A.G.; Biron, P. M.; Dussault, C. y Ouellet, J.-P (2011). *Trade-off Between Road Avoidance and Attraction by Roadside Salt Pools in Moose: An Agent-Based Model to Assess Measures for Reducing Moose-Vehicle Collisions*. Ecological Modelling vol. 222(8): 1423-1435. Disponible en [fecha de acceso 22.03.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.01.022>
593. Grunow, M.; Gunther, H.-O. y Lehmann, M. (2004). *Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals*. OR Spectrum, vol. 26(2): 211-235. Disponible en [fecha de acceso 22.03.2017] DOI: [10.1007/s00291-003-0147-1](https://doi.org/10.1007/s00291-003-0147-1)
594. Gu, J., Goetschalckx, M. y McGinnis, L. F. (2007). *Research on warehouse operation: A comprehensive review*. European Journal of Operational Research, vol. 177(1): 1–21. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>
595. Guan, Y.; Xiao, W.-Q.; Cheung, R. K. y Li, C.-L. (2002). *A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis*. Operations Research Letters, vol. 30(5): 343-350. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637702001475?np=y&npKey=0fcfa03e6c5b95dfc9441634075b31530f56148bdf19b5788672ce1dbc5240fb>

-
596. Guan, Y., y Cheung, R. K. (2004). *The berth allocation problem: models and solution methods*. OR-Spektrum 26(1): 75-92. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-003-0140-8>
597. Guan, C. y Liu, R.R. (2009). *Container terminal gate appointment system optimization*. Maritime Economics & Logistics, vol. 11(4): 378–398. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1057/mel.2009.13](https://doi.org/10.1057/mel.2009.13)
598. Guan, Y.; Yang, K.-H. y Zhou, S. (2013). *The crane scheduling problem: models and solution approaches*. Annals of Operations Research, vol. 203(1): 119-139. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] DOI: [10.1007/s10479-010-0765-3](https://doi.org/10.1007/s10479-010-0765-3)
599. Gudelj, A.; Krčum, M. y Twrdy, E. (2010). *Models and methods for operations in port container terminals*. Promet – Traffic & Transportation, vol. 22(1): 43-51. Disponible en [fecha de acceso 07.11.2016] <http://www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/163/70>
600. Guennouni, H. (1989). *Manuel d'utilisation de FLEXSIM*. Ecole des Hautes en Informatique, Paris France, 1989.
601. Guéret, C.; Prins, C. y Sevaux, M. (2005). *Applications of Optimization with Xpress-MP*. Dash Optimization Ltd, Blisworth, Reino Unido. 264 Páginas. ISBN: 0-9543503-0-8. . Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] http://www3.ntu.edu.sg/home/bernhard/lp/lp_book.pdf
602. Guetzkow, H.S.; Kotler, P. y Schultz, R. (1972). *Simulation in social and administrative science*. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall. 768 Páginas. ISBN 0138103828, ISBN-13: 9780138103828.
603. Guimaraes, R.C. y Kingsman, B.G. (1989). *Simulation-optimization: the method and its application in the analysis of grain terminal operations*. European Journal of Operational Research vol. 41(1): 44–53. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90037-4. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]. https://www.researchgate.net/publication/4756664_Simulation-optimisation_The_method_and_its_application_in_the_analysis_of_grain_terminal_operations
604. Gunnarsson, H.; Rönnqvist, M. & Carlsson (2006). *A combined terminal location and ship routing problem*. Journal of the Operational Research Society, vol. 57(8): 928–938. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] [doi:10.1057/palgrave.jors.2602057](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602057)

-
605. Günther, H. O. y Kim, K. H. (2006). *Container terminals and terminal operations*. OR Spectrum 28(4): 437–445. DOI: 10.1007/s00291-006-0059-y. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26-10-2016]. https://www.researchgate.net/publication/226429109_Container_terminals_and_terminal_operations
606. Guo, D.; Norrie, D. H. y Fauvel, O.R. (1990). *Object—oriented flexible manufacturing simulation*. Proceedings of the 1990 Summer Computer Simulation Conference (Society for Computer Simulation International, San Diego, Estados Unidos), pp: 225–230.
607. Guo, X., y S.Y. Huang (2008). *Performing a search for yard crane dispatching in container terminals*. Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, pp: 263-267. DOI: 10.1145/1774088.1774583 · Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26-10-2016] https://www.researchgate.net/publication/221002015_A_two_stage_yard_crane_workload_partitioning_and_job_sequencing_algorithm_for_container_terminals
608. Guo X.; Huang, S. Y.; Hsu, W. J. y Low, M.Y.H. (2009a). *A simulation based hybrid algorithm for yard crane dispatching in container terminals*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (editado por M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin y R. G. Ingalls), pp: 2320-2331. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/221526453_A_Simulation_based_Hybrid_Algorithm_for_Yard_Crane_Dispatching_in_Container_Terminals
609. Guo X.; Huang, S. Y.; Hsu, W. J. y Low, M.Y.H. (2009b). *Simulation-based dynamic partitioning of yard crane workload for container terminal operations*. Proceedings of the 42nd Annual Spring Symposium (ANSS), Marzo de 2009, San Diego, (California, Estados Unidos. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220953999_Simulation-Based_Dynamic_Partitioning_of_Yard_Crane_Workload_for_Container_Terminal_Operations
610. Guo, X. y Huang, S.H: (2010a). *A two stage yard crane workload partitioning and job sequencing algorithm for container terminals*. Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC), 22-26 de marzo de 2010, Sierre (Suiza). 7 Páginas. DOI: 10.1145/1774088.1774583 Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/221002015_A_two_stage_yard_crane_workload_partitioning_and_job_sequencing_algorithm_for_container_terminals
611. Guo, X. y Huang, S.H: (2010b). *Deciding on planning windows by partitioning time for yard crane anagement in container terminals*. 1st International Conference on

- Computational Logistics. 9 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/228420525_Deciding_on_planning_windows_by_partitioning_time_for_yard_crane_anagement_in_container_terminals
612. Guo, X.; Huang, S. Y.; Hsu, W. J. y Low, M. Y. H. (2011). *Dynamic yard crane dispatching in container terminals with predicted vehicle arrival information*. Advanced Engineering Informatics, vol. 25(3): 472-484. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/220371676_Dynamic_yard_crane_dispatching_in_container_terminals_with_predicted_vehicle_arrival_information
613. Guzzi, G.; Santillo, L. y Romano, E. (2013). *A new model to manage vessels flow in a Port Terminal*. Proceedings of the 7th International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling (ASM '13) Recent Advances in Mathematics, pp: 223-230 (ISBN: 978-1-61804-158-6; ISSN: 2227-4588. Disponible en [fecha de acceso el 07.02.2017] en <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/CambridgeUSA/MATHECO/MATHECO-34.pdf>.
614. Ha, B.-H.; Park, E.-J. y Lee, C.-H. (2007). *A simulation model with low level detail for container terminal and its applications*. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference. Editado por S. G. Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, J. D. Tew y R. R. Barton, pp: 2003-2011. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc07papers/249.pdf>.
615. Haghani, A. y Kaisar, E. I. (2001). *A model for designing container loading plans for container ships*. Working paper, University of Maryland, presented at Transportation Research Board 2001 Annual Meeting. (2001). Maryland (Estados Unidos).
616. Haikin, S. (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Pearson Education. 716 Páginas. ISBN-10: 0023527617 / ISBN-13: 978-0023527616.
617. Halvorsen-Weare, E. y Fagerholt, K. (2010). *Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints*. Annals of Operations Research 203(1): 1-20. DOI: 10.1007/s10479-010-0794-y Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/225982700_Routing_and_scheduling_in_a_liquefied_natural_gas_shipping_problem_with_inventory_and_berth_constraints
618. Hamill, L. y Gilbert, N. (2016). *Agent-Based Modelling in Economics*. John Wiley & Sons: New York. ISBN: 9781118456071. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] DOI: 10.1002/9781118945520. 256 Páginas.

619. Han X.; Lu Z. y Xi, L. (2010). *A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time*. European Journal of Operational Research 207(3): 1327-1340. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.07.018> Disponible en [fecha última consulta 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220288993_A_proactive_approach_for_simultaneous_berth_and_quay_crane_schedulingproblem_with_stochastic_handling_time
620. Han, L. (2006). *A Study On Port Economic Externality Based On System Dynamics*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335955446>.
621. Hanafi, S.; Jesus, J. y Semet, F. (2003). *The container assignment problem: a case study on the port of Lille*. Working paper, University of Valenciennes, presented at Odysseus.
622. Handini, D.W. y Uchida, M. (2013). *Using System Dynamics to Simulate the Management of Operation and Maintenance of Ship Machinery under a Port Availability Constraint*. International Journal of Supply Chain Management, vol. 2(4): 76-84. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 27.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/292652234_Using_system_dynamics_to_simulate_the_management_of_operation_and_maintenance_of_ship_machinery_under_a_port_availability_constraint
623. Hansen, P.; Oguz, C. y Mladenovic, N. (2008). *Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation*. European Journal of Operational Research, 191(3): 636-649. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.057>.
624. Harder, R. (2017) *OpenTS – Java Tabu Search*. The Computational Infraestructure for Operations Research. COIN – Or Fundation. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <https://www.coin-or.org/Ots/>
625. Harrald, J.R.; Mazzuchi, T.A.; Spahn, J.; Van Dorp, R., Merrick, J.; Shrestha, S. y Grabowski, M. (1998). *Using system simulation to model the impact of human error in a maritime system*. Safety Science, vol. 30(1-2): 235–247. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: 10.1016/S0925-7535(98)00048-4
626. Harris, A.G.; Holden, A.R.; Schroer, B.J. y Möeller, D.P.F. (2008). *A simulation approach to evaluating productivity improvement at a seaport coal terminal*. Journal of the Transportation Research Board 2062(1):19-24. DOI: 10.3141/2062-03. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017]

- https://www.researchgate.net/publication/245563119_A_Simulation_Approach_to_Evaluating_Productivity_Improvement_at_a_Seaport_Coal_Terminal
627. Hartmann, S. (2003). *A general framework for scheduling equipment and manpower on container terminals*. OR Spectrum vol. 26(1): 51–74. Disponible en [fecha de acceso 23.02.2017] DOI: 10.1007/s00291-003-0149-z
628. Hartmann, S. (2004). *Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics*, OR Spectrum 26(2): 171–192. DOI: 10.1007/s00291-003-0150-6. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/226565430_Generating_Scenarios_for_Simulation_and_Optimization_of_Container_Terminal_Logistics
629. Hassan, S. A. (1993). *Port activity simulation: An overview*. Simulation Digest (ACM SIGSIM Simulation), vol. 23(2): 17-36. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/234806460_Port_activity_simulation_An_overview
630. Hasan, M.H. (2012). *Framework for Intelligent Decision Support System for Traffic Congestion Management System*. Engineering, vol. 2(1): 270-289. doi:10.4236/eng.2010.24037. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] http://file.scirp.org/pdf/Engineering20100400008_74556187.pdf
631. Hayuth, Y.; Pollatschek, M.A. y Roll, Y. (1994). *Building a port simulator*. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, vol. 63(3): 179-189. DOI: 10.1177/003754979406300307. Disponible en [fecha de acceso 20.12.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979406300307>
632. He, J.; Chang, D.; Mi, W. y Yan, W. (2010). *A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane scheduling*. Transportation Research Part E, vol. 46(1): 136–155. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554509000878>
633. He, J.-l.; Zhang, W.-M.-; Huang Y.-f. y Yan, W (2013). *An efficient approach for solving yard crane scheduling in a container terminal*. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), October 2013, vol. 18(5): 606-619. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] DOI: 10.1007/s12204-013-1441-y
634. Heath, S.K.; Brailsford, S.C.; Buss, A. y Macal C.M. (2011). *Cross-paradigm simulation modeling: challenges and successes*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation

- Conference, pp: 2788-2802. Editado por S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspace, K.P. White, y M. Fu. Disponible en [fecha de acceso 07.10.2016] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a558539.pdf>
635. Heaven, T. y Studer, K.R. (1972). *Ship size and turn-around time - some empirical evidence*. Journal of Transport Economics and Policy vol. 6(1): 32-50. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] http://www.bath.ac.Reino Unido/e-journals/jtep/pdf/Volume_V1_No_1_32-50.pdf
636. Heilig, L. y Voß (2016). *Information systems in seaports: a categorization and overview*. Information Technology and Management, pp: 1- 23. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] DOI: 10.1007/s10799-016-0269-1
637. Henesey, L.E. (2002). *Enhancing terminal productivity through Artificial Intelligence: Multi-Agent System Approach*. Proceedings of the 26th Terminal Operators Conference (TOC-Europe 2002), Antwerp (Bélgica). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/267998305_Enhancing_terminal_productivity_through_Artificial_Intelligence_Multi-Agent_System_Approach.
638. Henesey, L.E. y Törnquist J. (2002). *Enemy at the gates: introduction of multi-agents in a terminal information community*. Proceedings of Ports and Marinas. Rodas (Grecia) y publicado posteriormente en Water Studies Series, vol. 12(2011): 23-32. Disponible en [fecha de acceso 17.01.2017] <http://www.bth.se/faculty/lhe/enemy%20at%20the%20gates/HeneseyTornquist.pdf>.
639. Henesey, L.E.; Wernstedt, F. y Davidsson, P. (2002). *A Market Based Approach to Container Port Terminal Management*. Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence, Workshop (ECAI 2002) - Agent Technologies in Logistics, Lyon (Francia). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2538809_A_Market-Based_Approach_to_Container_Port_Terminal_Management
640. Henesey, L.E. (2003). *More than just Piers: a multi-agent system in defining organization in a seaport terminal management system*. Proceedings of the 47th Annual Conference of the International Society for the Systems Sciences (ISSS) (Special Integration Group on Systems Applications to Business and Industry), Creta (Grecia). ISBN 0-974073504. (9 páginas). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/ISSS-2003/Final%20for%20ISSS-%202003.pdf>

-
641. Henesey, L.E., Notteboom, T., y Davidsson, P. (2003a). *Agent-based simulation of stakeholders relations: An approach to sustainable port and terminal management*. Proceedings of the International Association of Maritime Economists Annual Conference, Busan (Corea del Sur). 17 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/244452451_Agent-based_simulation_of_stakeholders_relations_An_approach_to_sustainable_port_terminal_management
642. Henesey, L.E.; Wernstedt, F. y Davidsson, P. (2003b). *Market Driven Control in Container Terminal Management*. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '03), Hamburgo (Alemania), pp: 377-386. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2832158_Market-Driven_Control_in_Container_Terminal_Management
643. Henesey, L.E. (2004a). *Enhancing Container Terminal Performance: A Multi Agent Systems Approach*. Department of Systems and Software Engineering. School of Engineering Blekinge Institute of Technology. Karlshamn, Sweden. Licentiate Series No 2004:06. 121 Páginas. ISSN 1650-2140 / ISBN 91-7295-040-4. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Lic.pdf>
644. Henesey, L.E. (2004b). *A Multi Agent Based Simulator for Managing a Container Terminal*. 2nd European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2004), 16 – 17 de diciembre de 2004, Barcelona (España). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/228772835_A_Multi_Agent_Based_Simulator_for_Managing_a_Container_Terminal
645. Henesey, L.E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2004). *Using Simulation in Berth Planning at a Container Terminal*. Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT'04), Siguëña (España) (9 -12 Mayo 2004), pp: 61-72. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/30499320_Using_Simulation_in_Evaluating_Berth_Allocation_at_a_Container_Terminal
646. Henesey, L.E. (2006a). *A Simulation Model for Analysing Terminal Management Operations*. Proceeding of the 4th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '05), Hamburgo, Alemania. (8-11 Mayo 2006), pp: 100-113. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Compit05/COMPIT2005%20Final.pdf>

647. Henesey, L.E. (2006b). *Multi-Agent Systems for Container Terminal Management*. Department of Systems and Software Engineering School of Engineering. Blekinge Institute of Technology (Sweden) Blekinge Institute of Technology Doctoral Dissertation Series (ISBN 978-91-7295-099-3). 295 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/phd.pdf>.
648. Henesey, L.E. y Persson, J.A. (2006). *Application of Transaction Costs In Analyzing Transport Corridors Using Multi-Agent-Based Simulation*. Promet Traffic & Transportation: Scientific Journal on Traffic and Transportation Research, vol. 18(2): 59-65. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/download/666/520
649. Henesey, L.E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006a). *Agent Based Simulation Architecture for Evaluating Operational Policies in Transshipping Containers*. 4th German Conference on Multiagent System Technologies (MATES 2006). Lecture Notes in Computer Science - LNAI Vol. 4196, pp: 73-85, Editado por K. Fischer y I. Timm (Eds), Springer-Verlag, Berlin y Heidelberg, Alemania. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/225651016_Agent_Based_Simulation_Architecture_for_Evaluating_Operational_Policies_in_Transshipping_Containers
650. Henesey, L.E.; Aslam, K. y Khurum, M. (2006b). *Task Coordination of Automated Guided Vehicles in a Container Terminal*. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT '06), Oud Poelgeest, Leiden (Holanda), pp: 54-64. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.bth.se/faculty/lhe/Compit06/COMPIT2006-Henesey%20final.pdf>
651. Henesey, L. E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006c). *Simulation of Operational Policies for Transshipment in a Container Terminal*. Proceedings of the 10th World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Multiconference on Circuits, Systems, Communications, and Computers, 13-15 Julio 2006, Atenas (Grecia), pp: 1289-1294. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/262278067_Simulation_of_operational_policies_for_transshipment_in_a_container_terminal
652. Henesey, L.E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2006d). *Evaluating Container Terminal Transshipment Operational Policies: An Agent-Based Simulation Approach*. Journal WSEAS Transactions on Computers, vol. 5(9): 2090-2098. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/242072279_Evaluating_Container_Terminal_Transshipment_Operational_Policies_An_Agent-Based_Simulation_Approach
653. Henesey, L.E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2007). *Comparison and evaluation of two automated guided vehicle systems in the transshipment of containers at a container terminal*. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, Leiden (Holanda), pp: 54-64. Publicado en Proceedings of the MODSIM World Conference 2007, Virginia Beach, Virginia (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/271504686_Comparison_and_Evaluation_of_Two_Automated_Guided_Vehicle_Systems_in_the_Transshipment_of_Containers_at_a_Container_Terminal
654. Henesey, L.E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2008). *Evaluation of Automated Guided Vehicle Systems for Container Terminals Using Multi Agent Based Simulation*. Proceedings of the 9th International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation pp: 85-96 (celebrado junto con AAMAS'08), 12-18 de Mayo de 2008, Estoril (Portugal). Disponible en [fecha de acceso 23.03.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-01991-3_7
655. Henesey, L.E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2009a). *Evaluation of automated guided vehicle systems for container terminals using multi agent based simulation*. Multi-Agent-Based Simulation IX: International Workshop, vol. 2569, pp: 85–96, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/30498925_Evaluation_of_Automated_Guided_Vehicle_Systems_for_Container_Terminals_Using_Multi_Agent_Based_Simulation
656. Henesey, L.E.; Davidsson, P. y Persson, J.A. (2009b). *Agent based simulation architecture for evaluating operational policies in transshipping containers*. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, vol. 18(2): .220–238. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1499102.1499106>
657. Hennig, F.; Nygreen, B.; Christiansen, M. y Warrick, P.H. (2012). *Maritime crude oil transportation - A split pickup and split delivery problem*. European Journal of Operational Research vol. 218(3): 764-774. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] DOI: [10.1016/j.ejor.2011.09.046](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.046)
658. Henriksen, J. O. (1976). *Building a better GPSS: a 3:1 enhancement*. Proceedings of the 1975 Winter Simulation Conference, pp: 465-469. New Jersey: AFIPS Press

-
659. Henriksen, J. O. (1985). *The development of GPSS/85*. Proceedings of the 18th Annual Symposium on Simulation, editado por A. Miller (pp: 61-67). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 10.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/234796544_The_development_of_GPSS85
660. Henriksen, J. O. (1993). *SLX. The successor of GPSS/H*. Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, editado por G. Evans, M. Mollaghasemi, E. Russell y W. Biles, pp: (502-509). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.. Piscataway (New Jersey, Estados Unidos).
661. Henriksen, J.O. (2000). *SLX – The X is for Extensibility*. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference Editado por J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, y P. A. Fishwick. 9 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://www.wolverinesoftware.com/SLX00.pdf>
662. Heppenstall, A.J.; Crooks, A.T.; See, L.M. y Batty, M. *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Springer: Dordrecht. ISBN: 978-90-481-8926-7. Springer: New York, pp: 85–108. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://www.springer.com/us/book/9789048189267>
663. Herlyn, W. (2014). *The Bullwhip Effect in expanded Supply Chains and the Concept of Cumulative Quantities*, incluido en Blecker et al. (Eds.): "*Innovative Methods in Logistics and Supply Chain Management*". Páginas 513-528, epubli GmbH, Berlin, 2014, ISBN 978-3-8442-9878-9. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <https://hicl.org/publications/2014/19/515.pdf>.
664. Herper, H. y Ståhl, I. (1999). *Micro-GPSS on the Web and for Windows: a tool for introduction to simulation in high schools*. Proceedings of the 31st Winter Simulation Conference. pp: 298- 306. Editado por P. A. Farrington, H. B. Nemhard, D. T. Sturrock, y G. W. Evans. Disponible en [fecha de acceso el 03.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/042.PDF>
665. Hielscher (2011). *Simulation and Modeling I: Simulation software*. Lectures notes del Departamento de Ciencias Computacionales de la Friedrich – Alexander Universitat (Erlangen – Nürnberg, Alemania). Disponible en [fcha de acceso el 25.10.2016] http://www7old.informatik.uni-erlangen.de/~ksjh/Teaching/1112W/sm1/r/lenotes/SM_10_SimSW.pdf
666. Hill, D.C. (1961). *Discussion of Prediction of Maximum Practical Berth Occupancy by Thomas J. Fratar, Alvin S. Goodman and Austin E. Brant Jr*. Proceedings of the American

- Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways and Harbours Division. American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 126(4): 642-642.
667. Hillen, D.W. y Warner D. (1993). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceedings of the 27th Winter Simulation Conference. (1993). Editado por G.W.Evans, M. Mollaghasemi E.C. Russell y W.E. Biles. Páginas: 277-282. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] http://www.informs-sim.org/wsc93papers/1993_0040.pdf.
668. Hitchcock, F. (1941). *The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities*. Journal of Mathematics and Physics, vol. 20 (1-4): 224-230. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] DOI: [10.1002/sapm1941201224](https://doi.org/10.1002/sapm1941201224).
669. Ho, K. H.; M.W. Hoy C.M. Hui (2008). *Structural Dynamics in the Policy Planning of Large Infrastructure Investment under the Competitive Environment: Context of Port Throughput and Capacity*. Journal of Urban Planning and Development, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 134(1): 9–20. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2008\)134%3A1\(9\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9488(2008)134%3A1(9))
670. Hockney, L.A. (1979), *Port Handbook for Estimating Marine Terminal Cargo Handling Capability*. U.S. Department of Commerce, Maritime Administration, Office of Port and Intermodal Development. 224 Páginas.
671. Hockney, L.A. y Whiteneck, L.L. (1986), *Port Handbook for Estimating Marine Terminal Cargo Handling Capability*. Moffatt & Nichol, Engineers para U.S. Department of Commerce, Maritime Administration, Office of Port and Intermodal Development, 224 Páginas.
672. Hodge, B.-M- S.; Huang, S.; Sirola, J.D.; Pekny, J. F. y Reklaitis G.V. (2011). *A multi-paradigm modeling framework for energy systems simulation and analysis*. Computers & Chemical Engineering, vol. 35(9): 1725-1737. Disponible en [fecha de acceso 04.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135411001669>
673. Holguín-Veras, J. y Jara-Díaz, S. (1999). *Optimal pricing for priority service and space allocation in container ports*. Transportation Research-B 33(2): 81–106. Disponible en [fecha de acceso 04.11.2016] [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(98\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00029-0)
674. Holguin-Veras, J. y Walton, C.M. (1995). *A Categorized and Annotated Bibliography to the Performance Analysis of Port Operations*. Interim Report SWUTC/95/721912-1. Southwest Region University Transportation Center - Center for Transportation Research

- The University of Texas. Texas (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 17.01.2017] en <http://library.ctr.utexas.edu/digitized/swutc/721912-1.pdf>.
675. Holguín-Veras, J. y Walton, C.M. (1996). *An Empirical Investigation of Alternative Approaches to the Simulation of Gantry Crane Operations*. Proceedings of the 38th Annual Meeting of Transportation Research Forum, Vol. 2(1): 459-477. San Antonio, Texas (Estados Unidos).
676. Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor. 1975. Reeditado en 1992 con ISBN: 9780262082136. (211 Páginas).
677. Hollocks, B.W. (2008). *Intelligence, innovation and integrity—KD Tocher and the dawn of simulation*. Journal of Simulation 2008(2): 128–137. doi:10.1057/jos.2008.15 Disponible en (fecha de acceso 29.10.2016) <http://www.themedfomscu.org/media/elip/jos200815a.pdf>.
678. Holmevik, J.R. (1994). *Compiling SIMULA: a historical study of technological genesis*. IEEE Annals of the History of Computing, 16(4): 25-37, 1994. Artículo también presentado en 18th ASU Conference en 1992, y publicado en SIMULA Newsletter, vol.20(1), October 1992.
679. Hooghiemstra, J.S.; Kroon, L.G.; Odijk, M.A. y Christiansen, M. (1999). *Decomposition of a combined inventory and time-constrained ship routing problem*. Transportation Science, vol. 33(1): 3-16. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/262167903_Decomposition_of_a_Combined_Inventory_and_Time_Constrained_Ship_Routing_Problem
680. Hoshino, S.; Ota, J.; Shinozaki, A. y Hashimoto, H. (2005). *Highly efficient AGV transportation system management using agent cooperation and container storage planning*. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference Intelligence Robots and Systems, pp: 1588-1593. Disponible en [fecha de acceso 24.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/224623325_Highly_efficient_AGV_transportation_system_management_using_agent_cooperation_and_container_storage_planning
681. Howard, L.D.; Bragen M.J.; Burke, J.F. Jr. y Love, R.J. (2004):. *PORTSIM 5: A modeling from seaport level*. Mathematical and computer Modelling: Defense transportation: Algorithms, models, and applications for the 21st century, vol. 39 (6-8): 715-731. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/245125186_PORTSIM_5_Modeling_from_a_seaport_level

-
682. Hsieh, S., Hwang J.S. y Chou, H.C. (1998). *A Petri-net-based structure for AS/RS operation modelling*. International Journal of Production Research, vol. 36(12): 3323-3346. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/002075498192085>
683. Hsieh, S. y Tsai, K.C. (2001). *A BOM oriented class-based storage assignment in an automated storage/retrieval system*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 17(1): 683-691. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] DOI: [10.1007/s001700170134](https://doi.org/10.1007/s001700170134)
684. Hsu, W.-K. W. y Chen J.Y. (1997). *The procurement and shipping policy of imported blending coals*. Recurso en red no publicado. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]. <http://web.idv.nkmu.edu.tw/~khsu/main/paper/conference/2004Shipping%20andProcurement.pdf>.
685. Hu, W.; Hu, Z.; Shi, L.; Luo, P. y Song, W. (2012). *Combinatorial Optimization and Strategy for Ship Stowage and Loading Schedule of Container Terminal*. Journal of computers, vol. 7(8): 2078-2092. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://www.jcomputers.us/vol7/jcp0708-35.pdf>
686. Hua, E. (2013). *Growing pains at China's top ro-ro port*. Automovie Logistics (recurso en línea). Disponible en [fecha de acceso 20.05.2017] <http://automotive-logistics.media/intelligence/navigating-growth-at-chinas-top-ro-ro-ports#4>
687. Huang, W.-C. (1990). *A research on the characteristics of port system*. Transportation scheme Quaterly Periodical, vol. 19(2): 241-268.
688. Huang, W.-C.; Chishaki, T., y Li, G. (1995). *A Study on the Container Port Planning by Using Cost Function with IND Based on M/E_K/N System,* Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 1(1): 263-276.
689. Huang, W.-C. y Wu, S.C. (2005). *The estimation of the initial number of berths in a port system based on cost function*. Journal of Marine Science and Technology, vol. 13(1): 35-45. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/13-1/35-45.pdf>
690. Huang, W.-C. y Karimi, I.A. (2006a). *Scheduling Tanker-Lightering Operations in Crude Oil Transportation*. Industrial & Engineering Chemistry Research 45(24): 8063-8082. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie060379j](https://doi.org/10.1021/ie060379j)

691. Huang, W.-C. y Karimi, I.A. (2006b). *Scheduling Transshipment Operations in Maritime Chemical Transportation*. Industrial & Engineering Chemistry Research vol. 45(6):1955-1973. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie050840s](https://doi.org/10.1021/ie050840s)
692. Huang, W.-C.; Kuo, T.-C.; Wu, S.-C. y Li, G. (2007). *Evaluation of operation performance for container terminal from micro point view*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 7(1): 3103-3118. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/easts/7/0/7_0_3103/_pdf
693. Huang, W.-C. y He, K. (2009). *A new heuristic algorithm for cuboids packing with no orientation constraints*. Computer & Operations Research 36 (2009): 425-432. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/a-new-heuristic-algorithm-for-cuboids-packing-with-no-orientation-NCX23FTOEW>
694. Huang, W.-C.; Kuo, T.-C.; Wang, J. y Wu, C.-T. (2010). *A Research of the Improvement Strategy of the Operation Performance of Container Terminal*. Proceedings of the Eastern Society for Transportation Studies, vol. 8(2010): 2256-2271. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/easts/8/0/8_0_2256/_pdf
695. Huang, W.-C.; Kuo, T.-C.; Wu, C.-T. y Kuo, C.-C. (2012). *Port Management Improvement Strategies based on Simulation Model*. Journal of Marine Science and Technology, vol. 20(5): 492-507. DOI: 10.6119/JMST-011-0426-1 Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/20-5/492-507.pdf>
696. Hudlicka, E. (1996). Requirements Elicitation with indirect knowledge Elicitation Techniques: Comparison of three methods. Proceedings of the International Conference on Requirement Engineer - ICRE'96. Páginas: 4-11. 15 a 18 de abril de 1996 Colorado Springs (Colorado Estados Unidos). ISBN: 0-8186-7252-8. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://www.panda.sys.t.u-tokyo.ac.jp/kushiro/ReferencePaper/Requirements%20Elicitation/00491424.pdf>
697. Hudlicka, E. (1997). *Summary of Knowledge Elicitation Techniques for Requirements Analysis*. Course Material for Human Computer Interaction. Worcester Polytechnic Institute. Worcester (Massachusetts, Estados Unidos)
698. Hullinger, D.R. (1999). *Taylor Enterprise Dynamics*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Editado por P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans. Páginas: 227-229. Disponible en [fecha de acceso 24.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/030.PDF>

-
699. Hunt, C.A.; Kennedy, R.C.; Kim, S.H.J. y Ropella, G.E.P. (2013). *Agent-based modeling: A systematic assessment of use cases and requirements for enhancing pharmaceutical research and development productivity*. Systems Biology and Medicine, vol. 5(4): 461–480. Disponible en [fecha de acceso 24.06.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wsbm.1222/full>
700. Hur, S. y Nam, J. (2006). *Performance analysis of automatic storage/retrieval systems by stochastic modelling*. International Journal of Production Research, vol. 44(8): 1613–1626. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540500410176>
701. Hurst, N.R. y Pritsker, A.A.B. (1973). *Simulation of a chemical reaction process using GASP IV*. SIMULATION, vol. 21(3): 71-75. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/003754977302100303>
702. Huynh, N. y Vidal, J.M. (2010). *An Agent-Based Approach to Modeling Yard Cranes at Seaport Container Terminals*. Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling and Simulation, 2010. Páginas: 1-8. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] <http://jmvidal.cse.sc.edu/papers/huynh10a.pdf>
703. Huynh, N. y Vidal, J.M. (2012). *A novel methodology for modelling yard cranes at seaport to support planning and realtime decision making*. Six Sigma Coma. Ad vol. 7(1): 62-91. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1504/IJSSCA.2012.045265>
704. Hwang Y.K. y Ahuja N. (1992). *A potential field approach to path planning*. Transaction on Robotics and Automation, vol. 8(1): 23-32. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] http://vision.ai.illinois.edu/publications/potential_field_TRA_1992.pdf
705. Hwang, S. (2005). *Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk*. School of Industrial and Systems Engineering. Master Thesis. Georgia Institute of Technology (Georgia, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/6928/Hwang_Seungjune_200505_phd.pdf;sequence=1
706. Iakovou, E.; Douligieris, C.; Li, H.; Ip, C. y Yudhbir, L. (1999). *A maritime global route planning model for hazardous materials transportation*. Transportation Science, vol. 33(1): 34–48. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: 10.1287/trsc.33.1.34

-
707. Iakovou, E.T. (2001). *An interactive multiobjective model for the strategic maritime transportation of petroleum products: risk analysis and routing*. Safety Science, vol. 39 (1-2): 19–29. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1016/S0925-7535\(01\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00022-4)
708. Iannone, R.; Miranda, S.; Prisco, L. y Sarno, D. (2016). *Proposal for a flexible discrete event simulation model for assessing the daily operation decisions in a Ro–Ro terminal*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 61(1): 28-46. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 21.05.2017] DOI: [10.1016/j.simpat.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.11.005)
709. Ierapetritou, M. G. y Floudas, C. A. (1998a). *Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling: Multipurpose: 1. Batch Processes*. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 37(11): 4341-4359. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie970927g](https://doi.org/10.1021/ie970927g)
710. Ierapetritou, M. G. y Floudas, C. A. (1998b). *Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling: 2. Continuous and Semicontinuous Processes*. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 37(11): 4360-4374. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1021/ie9709289](https://doi.org/10.1021/ie9709289)
711. IGU (2016). *IGU World Gas LNG Report – Edition 2016*. International Gas Union (IGU) Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://www.igu.org/publications/2016-world-lng-report>
712. Imai, A. y Miki, T. (1989) *A heuristic algorithm with expected utility for an optimal sequence of loading containers into a containerized ship*. Journal of Japan Institute of Navigation, vol. 80, pp: 117-124.
713. Imai, A.; Nishimura, E. y Papadimitriou, S. (2001). *The dynamic berth allocation problem for a container port*. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 35(4): 401-417. Disponible en [fecha de acceso 27-01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261599000570>
714. Imai, A.; Nishimura, E., y Papadimitriou, S. (2003). *Berth allocation with service priority*. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 37(5): 437-457. Disponible en [fecha de acceso 27-01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261502000231>
715. Imai, A.; Sun, X.; Nishimura, E. y Papadimitriou, S. (2005). *Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach*. Transportation Research

- Part B: Methodological, vol. 39(3), 199-221. Disponible en [fecha de acceso 27-01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261504000505>
716. Imai, A.; Nishimura, E.; Hattori, M. y Papadimitriou, S. (2007). *Berth allocation at indented berths for mega-containerships*. European Journal of Operational Research, vol. 179(1): 579–593. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/4754144_Berth_allocation_at_indented_berths_for_mega-containerships.
717. Imai, A.; Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2008a). *Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity*. Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review, vol. 44(1): 136-151. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136655450600041X>
718. Imai, A.; Chen, H.C.; Nishimura, E., y Papadimitriou, S. (2008b). *The Simultaneous Berth and Quay Crane Allocation Problem*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, vol. 44(5): 900-920. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] DOI: [10.1016/j.tre.2007.03.003](https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.03.003).
719. Imani, A; Nishimura, E.; Papadimitriu, S. y Sasaki, K. (2002). *The contenier loading problem*. International Journal of Maritime Economics, vol. 4(2): 126-14.
720. Imani, A; Sasaki, K.; Nishimura, E. y Papadimitriu, S. (2006). *Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks*. European Journal of Operational Research, vol. 171(2): 373–389. Disponible en [fecha de acceso 27-01.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.066>
721. INCONTROL (2016). *Entreprise Dynamics ® 10 Release!*. INCONTROL Simulation Solutions. Utrecht (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017] <http://www.incontrolsim.com/enterprise-dynamics-10-released/>
722. INCONTROL (2017). *Incontol Simulation Solutions*. INCONTROL Simulation Solutions. Utrecht (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://www.incontrolsim.com/company/>
723. Ingber, L. (1993). *Simulated annealing: Practice versus theory*. Journal of Mathematical and Computational Modeling, vol. 18(11): 29–57. doi:10.1016/0895-7177(93)90204-C. Disponible en [fecha de acceso 15.09.2017] https://www.researchgate.net/publication/222479675_Simulated_Annealing_Practice_Versus_Theory

-
724. INPLAN (2017). *INPLAN Terminal Operating Solution (TOS)*. INPLAN GmbH Software for Logistics. Mülheim, Essen (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] <http://www.inplan.de/software.php?category=5>
725. INTERCARGO (2016). *Dry Bulk Trades: Industry Statistics*. Copyright © Intercargo (2016). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 30.11.2016] <http://www.intercargo.org/en/industry/58-trades.html#industry-statistics>
726. Ioannou, P.A.; Jula, H. y Dougherty, E. (2001). *Advanced Material Handling: Automated Guided Vehicles in Agile Ports*. FINAL REPORT - Task 1.2.6.1 preparado para el Center for Commercial Deployment of Transportation Technologies (California State University at Long Beach, California, Estados Unidos) por el Center for Advanced Transportation Technologies (University of Southern California, California, Estados Unidos). 135 páginas. Disponible en [fecha de acceso 10.05.2017] <http://catt.usc.edu/assets/001/68519.pdf>
727. Iris, C.; Pacino, D.; Ropke, S. y Larsen, A. (2015). *Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem: Set partitioning models and computational results*. Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review., vol. 81(2015): 75-97 (Septiembre 2015). DOI: 10.1016/j.tre.2015.06.008. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/281169639_Integrated_Berth_Allocation_and_Quay_Crane_Assignment_Problem_Set_partitioning_models_and_computational_results
728. ISL (2015). *CHESSCON Virtual Terminal*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://www.downloads.isl-applications.com/CHESSCON-Virtual-Terminal.pdf>
729. ISL (2016a). *ISL Application References*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://www.chesscon.com/isl/References.html>
730. ISL (2016b). *CHESSCON: References*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.downloads.isl-applications.com/ISL-Applications-References.pdf>

-
731. ISL (2016c). *CHESSCON: Terminal View*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/TerminalView.html>
732. ISL (2016d). *CHESSCON: Capacity*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/Capacity.html>
733. ISL (2016e). *CHESSCON: Siulation*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/Simulation.html>
734. ISL (2016f). *CHESSCON: Virtual Terminal*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/VirtualTerminal.html>
735. ISL (2016g). *CHESSCON: Yard View*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/YardView.html>
736. ISL (2016h). *CHESSCON: Shift Preview*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.chesscon.com/ShiftPreview.html>
737. ISL-SCUSY (2009). *Simulation of container unit handling system*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] http://www.isl.org/products_services/scusy/index.php
738. ISL-VITO (2010). *VITO – virtual terminal optimisation*. Institute for Shipping Economics and Logistics - ISL Applications GMBH. Barkhausenstrasse 2. 27568 Bremerhaven (Alemania). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] Disponible en <https://www.isl.org/en/projects/vito>

-
739. ITInc (1989). *Extend 1.1 Software Manual*. Imagine That Inc. San Jose (California, Estados Unidos).
740. ITInc (1992). *Extend 2.0*. Imagine That Inc. Software Manual, San Jose (California, Estados Unidos).
741. ITInc (1995). *User's Manual for Extend 3.x*. Imagine That Inc. San Jose (California, Estados Unidos).
742. ITInc (2001). *Extend 5.0 User's Guide*. Imagine That Inc. San Jose (California, Estados Unidos).
743. ITInc (2007). *ExtendSim 7 User Guide*. Imagine That Inc. San Jose (California, Estados Unidos).
744. Jackson, J.R. (1963). *Jobshop-like Queuing Systems*. Management Science, vol. 10(1): 131-142. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/296776.pdf>
745. Jackson, J. (2010). *Improving energy efficiency and smart grid program analysis with agent-based end-use forecasting models*. Energy Policy, vol. 38(2010): 3771–3780, Disponible en [fecha de acceso 25.03.2017] <http://www.maisy.com/agentbm.pdf>
746. JADE (2009) (noticia publicada el 16 de junio de 2009). *Port Nelson Extends Jade Master Terminal To Manage Break Bulk Cargo*. JADE Logistics. Christchurch (Nueva Zelanda). Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] https://secure.jadeworld.com/downloads/news/pr_PtNelsonWarehousing.pdf
747. JADE (2015). *World Cargo News talk to Jade's Kaustubh Dalvi about the recent installation of Master Terminal at Abu Dhabi Ports*. JADE Logistics. Christchurch (Nueva Zelanda). Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <https://www.jadeworld.com/media-center/world-cargo-talk-jades-kaustubh-dalvi-about-recent-installation-master-terminal-at-abu-dhabi-ports/>
748. JADE (2017a). *Jade. Master Terminal TOS*. © Jade Software Corporation. Christchurch, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <https://www.jadeworld.com/solutions-for/logistics/master-terminal-tos/>
749. JADE (2017b). *Jade. Master Technical Overview*. © Jade Software Corporation. Christchurch, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <https://www.jadeworld.com/pdf/jml/jade-logistics-master-terminal-tos-product-overview.pdf>

-
750. JADE (2017c). *Jade: Our customers, satisfied logistics clients around the world*. © Jade Software Corporation. Christchurch, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <https://www.jadeworld.com/solutions-for/logistics/our-customers/>
751. Jagathy, R., Bhasi, M. y Acharya, D. (2001). *Optimization of the barge mix for raw material ship lightering and HRC loading into export ships for a new coastal integrated steel plant*. Proceedings of 1st International Conference on Logistic and Supply Chain Management. Coimbatore: PSG College of Technology, 2001; Páginas 6–8. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/261179722_Optimization_of_Barge_mix_for_Raw_Material_Ship_Lightering_and_HRC_Loading_into_Export_Ships_for_a_New_Coastal_Integrated_Steel_Plant
752. Jagathy, R. y Acharya, D. (2007). *A decision support system for raw materials procurement and finished goods supply logistics of a coastal integrated steel plant*. Recurso no público disponible en red.). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/researcher/2093445557_D_Acharya
753. Jagerman, D. y Altiok, T. (2003). *Vessel arrival process and queueing in marine ports handling bulk materials*. Queueing systems, vol. 45(3): 223-243. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [doi>10.1023/A:1027324618360](https://doi.org/10.1023/A:1027324618360)
754. Jansson, J. O. y Shneerson, D. (1982). *Port Economics*. MIT Press, Masachusetts (Estados Unidos). 194 Páginas. ISBN-10: 0262100258 y ISBN-13: 978-0262100250.
755. Jaswar, Sanusi, Siow, C.L. y Wati A. (2012). *Optimization of rounded-shape floating LNG supply chain efficiency with simulation modelling*. Recent Advances in Automatic Control, Modelling and Simulation. - International Conference on Marine Technology, 2012, pp: 26-33 Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Morioka/ACMS/ACMS-03.pdf>
756. Javanshir, H. y Seyedalizadeh, G.S.R. (2010). *Yard crane scheduling in port container terminals using genetic algorithm*. Journal of Industrial Engineering International, vol. 6 (11): 39-50. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/200581107_Yard_crane_scheduling_in_port_container_terminals_using_genetic_algorithm
757. Jerry, K.; Yujun, K.; Kwasi, O.; Enzhan, Z. y Parfait, T. (2015). *NetLogo implementation of an ant colony optimisation solution to the traffic problem*. Intelligent Transport Systems, IET, vol. 9(9): 862-869. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/280558637_NetLogo_implementation_of_an_ant_colony_optimisation_solution_to_the_traffic_problem
758. Jetlund, A.S. y Karimi, I.A. (2004). *Improving the logistics of multi-compartment chemical tankers*. Computers & Chemical Engineering, vol. 28(8): 1267-1283. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.08.009
 759. Jhonson, J.G. y Busemeyer, J. (2001). *Multiple-Stage Decision-Making: The effect of planning horizon length on dynamic consistency*. Theory and Decision 51(2001): 217–246. (© 2002 Kluwer Academic Publishers). Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] http://www.users.miamioh.edu/johnsojg/lab/papers/JB_TD01.pdf
 760. JICA (2007). *The Feasibility Study on the Development of Road RO-RO Terminal System for Mobility Enhancement in the Republic of the Philippines*. Japan International Cooperation Agency (JICA). Department of Transportation and Communications (DOTC). 81 páginas. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/11866654_01.pdf
 761. Jin, C. y Gao, P (2006). *Container Berth Expansion Planning with Dynamic Programming and Fuzzy Set Theory*. Proceedings of the IEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI '06), pp: 260-265. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/251831648_Container_Berth_Expansion_Planning_with_Dynamic_Programming_and_Fuzzy_Set_Theory
 762. Jin, C.; Ren, Y.; Higuchi, Y. e Ito, H. (1999). *Optimum Design for Port Logistics System for Bulk Cargo with Fuzzy Set Theory*. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 65-635, C(1999-7), pp: 3010-3017 (en Japonés) (1999). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/275490545_Optimum_Design_for_Port_Logistics_System_for_Bulk_Cargo_with_Fuzzy_Set_Theory
 763. Johansson, S.J.; Davidsson, P. y Carlsson, B. (2000). *Coordination models for dynamic resource allocation*. Proceedings of the 4th International Conference on Coordination Languages and Models (Editado por A. Porto y G.-C. Roman), volumen 1906 (Lecture notes in computer science), pp: 182–197. Springer Verlag, 2000. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-45263-X_12
 764. Johansson, S.J.; Davidsson, P. y Kristell, M. (2002). *Four architectures for dynamic resource allocation*. Proceedings of 4th International Workshop on Mobile Agents for Telecommunication Applications, 2002. Springer Verlag, LNCS

-
765. John, B.; James J. y Rengaraj R.M. (2013). *Analysis and Optimization of Plant Layuot using Relative Allocation of Facilities Technique*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 3(8): 514-520 (ISSN 2250-2459). Disponible en [fecha de acceso 21.01.2017] http://ijetae.com/files/Volume3Issue8/IJETAE_0813_80.pdf
766. Joines, J.A. y Roberts. S.D. (2016). *Simulation Modeling with SIMIO: A Workbook – 4th Edition*. Publicado por Simio LLC y Amazon's CreateSpace. ISBN 13 978-1-51-9142207 / ISBN 10: 1-51-914220-X). 432 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.simio.com/publications/SMSWorkbook/index.php>
767. Jones, J. H., y Blunden, W. R. (1968). *Ship turn-around time at the port of Bangkok*. Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 94(2): 135-148.
768. Jung, D. H.; Park, Y.-M.; Lee, B. K.; Kim, K. H. y Ryu, K. R. (2006). *A quay crane scheduling method considering interference of yard cranes in container terminals*. MICAI 2006: Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science, 4293, pp: 461-471. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/11925231_43#page-1
769. Jung, S. H. y Kim, K. H. (2006). *Load scheduling for multiple quay cranes in port container terminals*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 17: 479–492. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] [doi:10.1007/s10845-005-0020-y](https://doi.org/10.1007/s10845-005-0020-y).
770. Kabak, I.W. (1968). *Blocking and Delays in $M(n)/M/c$ Bulk Queuing Systems*. Operations Research vol. 16(4): 830-840. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] [doi>10.1287/opre.16.4.830](https://doi.org/10.1287/opre.16.4.830)
771. Kabak, I.W. (1970). *Blocking and delays in $M^x/M/c$ bulk arrival queueing systems*. Management Science, vol. 17(1): 112-115. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] [DOI: 10.1287/mnsc.17.1.112](https://doi.org/10.1287/mnsc.17.1.112)
772. Kaihara, T. (2003). *Multi-Agent Based Supply Chain Modelling with Dynamic Environment*. International Journal of Production Economics, vol. 85(2): 263-269. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/16374.pdf>
773. Kalyanaraman, P. y Keerthika, C. (2016). *A Review on Automated Storage/ Retrieval Systems and Shuttle Based Storage/Retrieval Systems*. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 4(11): 167-171. ISSN:

- 2321-8169. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017]
http://www.ijritcc.org/download/browse/Volume_4_Issues/November_16_Volume_4_Issue_11/1480410197_29.11.2016.pdf
774. Kang J-G. y Kim, Y-D. (2002). *Stowage planning in maritime container transportation*. Journal of the Operational Research Society vol. 53(4): 415–426. (2002). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]
https://www.jstor.org/stable/822825?seq=1#page_scan_tab_contents
775. Kang, J.; Ryu, K.R. y Kim, K.H. (2006). *Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 17(4): 399-410. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]
<http://link.springer.com/article/10.1007/s10845-005-0013-x>
776. Kang, S.; Medina, J.C. y Ouyang, Y. (2008). *Optimal operations of transportation fleet for unloading activities at container ports*. Transportation Research B, 2008, vol. 42(10): 970-984. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.003>
777. Kao, C.; Chen, C.Y. y Lyu, J. (1993). *Determination of optimal shipping policy by inventory theory*. International Journal of Systems Science 24(7): 1265-1273. DOI: 10.1080/00207729308949558. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017].
https://www.researchgate.net/publication/233312027_Determination_of_optimal_shipping_policy_by_inventory_theory
778. Kaptein, R. (2013). *Bulk Terminal Planning Trends – Using Simulation*. Moffat and Nichol Inc. Long Beach, California (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017].
<http://aapa.files.cms-plus.com/SeminarPresentations/2013Seminars/13TerminalTraining/Kaptein%2C%20Robert.pdf>.
779. Karakaneva, J. (1999). *The modular simulation language (MODSIM) – A Powerful Tool for Computer Simulation*. Information & Secutiry, vol. 3(1): 132-139. Disponible en [fecha de acceso 12.11.2016]
http://connections-qj.org/system/files/03.09_Karakaneva.pdf.
780. Karam, A.; Eltawil, A.; Mizutani, T. y Harraz, N. (2014). *Quay crane allocation problem with the internal truck capacity constraint in container terminals*. Proceedings of RIMS Workshop "Optimization Algorithms: theory, application and implementation", Research Institute of Mathematical Sciences, Kyoto University (Kyoto, Japón). Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017]

- https://www.researchgate.net/publication/273575796_Quay_crane_allocation_problem_with_the_internal_truck_capacity_constraint_in_container_terminals
781. Karcanias, N. y Hessami, A. (2010a). *Complexity and the notion of System of Systems: Part (I): general systems and complexity*. Proceedings of the World Automation Congress, WAC-2010, 19-23 de Septiembre de 2010, Kobe (Japón), vol. 1(1): 912-918. ISBN 978-1-4244-9673-0. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://ieeexplore.ieee.org/document/5665613/>
782. Karcanias, N. y Hessami, A. (2010b). *Complexity and the notion of System of Systems: Part (II): defining the notion of System of Systems*. Proceedings of the World Automation Congress, WAC-2010, 19-23 de Septiembre de 2010, Kobe (Japón), vol. 1(1): 919-925. ISBN 978-1-4244-9673-0. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://ieeexplore.ieee.org/document/5665614/>
783. Katalin, N. (1990). *Analytica: A Software Tool for Uncertainty, Analysis and Model Communication*. Capítulo 10 de “Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis” (Editado por M. Granger Morgan y Max Henrion). Cambridge University Press, New York, 1990, Revisada en 1992 y Reeditado en 1998. Páginas 257-290. ISBN-10: 0521427444 / ISBN-13: 978-0521427449 (346 páginas).
784. Kaveshgar, N.; Huynh, N. y Rahimian, S.K. (2012). *An efficient genetic algorithm for solving the quay crane scheduling problem*. Expert Systems with Applications 39(18): - 117. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/255821037_An_efficient_genetic_algorithm_for_solving_the_quay_crane_scheduling_problem
785. Kay, A.C. (1993). *The Early History of Smalltalk*. Apple Computer. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://worrydream.com/EarlyHistoryOfSmalltalk/>
786. Kayame, M.; Kunimune, H.; Hasimoto, M. y Otami, M. (2014). *Algorithmic Thinking Learning Support System in Block Programming Paradigm*. The 22nd International Conference on Computers in Education, Nara (Japón). Asia – Pacific Society for Computers in Education, pp: 276-284. También presentado en International Journal of Computer and Communication Engineering, Vol. 3(2): 134-140. DOI: 10.7763/IJCCE.2014.V3.307). Disponible en [fecha de acceso 01.05.2017] en <http://www.ijcce.org/papers/307-E049.pdf>.

787. Ke, L.; S. Cheng y Y. Jiangnan (2009). *The Combination Forecasting of Nanchang Port's Cargo Throughput*. International Conference on Management and Service Science, 2009. MASS '09, pp: 1–4. ISBN:978-1-4244-4638-4. DOI: 10.1109/ICMSS.2009.5302371. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.ieee-art-000005302371>
788. Keceli, Y. (2016). *A simulation model for gate operations in multi-purpose cargo terminals*. Maritime Policy & Management, vol. 43(8): 945-958. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2016.1169448>
789. Keceli, Y.; Aksoy, S. y Volkan, Y. (2013). *A simulation model for decision support in Ro-Ro terminal operations*. International Journal of Logistics Systems and Management, vol. 15(4): 338-358. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.054896>. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/262945353_A_simulation_model_for_decision_support_in_Ro-Ro_terminal_operations
790. Kefi, M.; Ghedira, K.; Korbaa, O. y Yim, P. (2007). *Container Handling Using Multi-Agent Architecture*. Proceedings of the Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, First KES International Symposium, KES-AMSTA 2007, 31 Mayo - 1 Junio de 2007, Wroclaw (Polonia), pp: 685-693. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/221254885_Container_Handling_Using_Multi-agent_Architecture
791. Kefi, M.; Ghedira, K.; Korbaa, O. y Yim, P. (2007). *Container Handling Using Multi-Agent Architecture*. Proceedings of the Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, First KES International Symposium, KES-AMSTA 2007, Wroclaw (Polonia), 31 Mayo - 1 Junio de 2007, pp: 685-693. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/221254885_Container_Handling_Using_Multi-agent_Architecture
792. Kelton W.D.; Sadowski R.P. y Sadowski D.A (2009). *Simulation with ARENA, 5th Edition* Ed. McGraw-Hill Professional. 5th Edición (2009). 656 páginas. ISBN-10: 0073376280 ISBN-13: 978-0073376288.
793. Kelton, W.D.; Smith, J.S. y Sturrock D.T. y Verbraeck, A.: (2010): *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications 1ª Edition*. Publicado por Simio LLC (Copyrightc 2014). 378 páginas.

-
794. Kelton, W.D., Sadowski, R. y Zupick, N. (2014). *Simulation with Arena, 6th edition*. Ed. McGraw-Hill Professional (2014). ISBN-10: 0073401315; ISBN-13: 978-0073401317. 656 páginas.
795. Kelton, W.D.; Smith, J.S. y Sturrock, D.T. (2013). *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications 3ª Edition*. Publicado por Simio LLC (Copyrightc 2014). 393 páginas.
796. Kelton W.D.; Smith J.S. y Sturrok, D.T. (2016). *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications. 4ª Edición* Publicado por Simio LLC y Amazon's CreateSpace. ISBN 13: 978-1-49-2116424 / ISBN 10 1-49-211642-4). 400 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.simio.com/publications/SMSWorkbook/index.php>
797. Kelly, G. (1955). *The Psychology of Personal Constructs*. New York: Norton, vols. 1 & 2, New York (Estados Unidos). W. W. Norton. 424 Páginas. ISBN 0415037972, 9780415037976
798. Kendall, D. G. (1953). *Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain*. The Annals of Mathematical Statistics, vol. 24(3): 338-354. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] [doi:10.1214/aoms/1177728975](https://doi.org/10.1214/aoms/1177728975). JSTOR 2236285.
799. Kendall, D.G. (1948). *On the role of variable generation time in the development of a sthocastic birth process*. Biometrika, vol. 35(3/4): 316-330. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://www.jstor.org/stable/2332354>.
800. Kendall, D.G. (1951). *Some problems in the theory of queues*. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), vol. 13(2): 151-173 y 184-185. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] : <http://www.jstor.org/stable/2984059>
801. Kendall, D.G. (1953). *Stochastic Processes occurring in the Theory of Queues and their analysis by the method of the imbedded Markov Chain*. The Annals of Mathematical Statistics, vol. 24(3): 338-354. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://www.jstor.org/stable/2236285>
802. Keserla, A. (1994). *Analysis of dual-shuttle automated storage/retrieval systems*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 13(6): 424-434. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(95\)90066-T](https://doi.org/10.1016/0278-6125(95)90066-T)

-
803. Khatib, O. y Le Maitre, J.F. (1978). *Dynamic control of manipulators operating in a complex environment*. Proceedings of the 3rd CISM-IFTToMM - Symposium Theory Practice Robots Manipulators, pp: 267-282. 12-15 de Septiembre de 1978. Udine (Italia). © Elsevier 1979. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] ai.stanford.edu/manips/publications/pdfs/Khatib_1978.pdf
804. Khatib, O. (1980). *Commande dynamique dans l'espace opérationnel des robots manipulateurs en présence d'obstacles*. Tesis Doctoral . École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (ENSAE). Toulouse (Francia). Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] https://cs.stanford.edu/group/manips/publications/pdfs/Khatib_1980_thesis.pdf
805. Khatib, O. (1983) *Dynamic control of manipulators in operational space*. Proceedings of the 6th CISM-IFTToMM - Congress Theory Machines Mechanisms, pp: 1128-1131. 15-20 de Diciembre de 1983, Nueva Delhi (India). Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] https://cs.stanford.edu/group/manips/publications/pdfs/Khatib_1983.pdf
806. Khatib, O. (1985). *The operational space formulation in robot manipulators control*. Proceedings of the 15th International Symposium on Industrial Robots (Editado por Japan Industrial Robot Association), 11-13 de Septiembre de 1985, Tokyo (Japón).
807. Khatib, O. (1986). *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*. International Journal of Robotics Research, vol. 5(1): 90 – 98. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498600500106>
808. Khatib, O. (1987). *A unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation*. Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3(1): 43-53. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] https://cs.stanford.edu/group/manips/publications/pdfs/Khatib_1987_RA.pdf
809. Khatib, O. y Burdick, J. (1987). *Dynamic optimization in manipulator design: the operational space formulation*. The International Journal of Robotics and Automation, vol. 1(1): 510-518.
810. Khintchine, A. (1932). *Mathematisches über die Erwartung vor einem öffentlichen Schalter*. Rec. Math., vol. 39(4): 73-84.
811. Khoshnevis, B. y Rogers, R. (1983). *An Automated Warehouse Simulator System*. Proceedings of the 5th International Conference on Automation in Warehousing, Atlanta, Georgia (Estados Unidos).

-
812. Khoshnevis, B. y Kiran, A. (1986). *A FMS Manufacturing Systems*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 5(1): 65-68. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(86\)90068-3](https://doi.org/10.1016/0278-6125(86)90068-3)
813. Khoshnevis, B. y Asef-vaziri, A. (2000). *3d virtual and physical simulation of automated container terminal and analysis of impact on in land transportation*. Metrans transportation Center - Universidad Southern California. California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] https://www.metrans.org/sites/default/files/research-project/99-14_Final_0_0.pdf
814. Kia, M.; Shayan, E. y Ghotb, F. (2002). *Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation*. Computers and Industrial Engineer, vol. 42 (2-4): 533-540. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00051-7)
815. Kiani, M.; Bonsall, S.; Wang, J. y Wall, A. (2006). *A break-even model for evaluating the cost of container ships waiting times and berth unproductive times in automated quayside operations*. WMU Journal of Maritime Affairs, 2006, vol. 5(2): 153-179. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1007/BF03195102](https://doi.org/10.1007/BF03195102)
816. Kiani, M.; Sayerh, J. y Nooramin S. (2010). *A simulation framework for optimizing truck congestions in maritime terminal*. Journal of Maritime Research, vol. 3(1): 55-70. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/viewFile/128/125>
817. Kiekhaefer, A.P. (2011). *Simulation, ranking and selection procedures and applications in network reliability design*. PhD Thesis supervisada por Y. Chen. Universidad de Iowa (Estados Unidos). 132 páginas. Disponible en [fecha de acceso 19.11.2017] <http://ir.uiowa.edu/etd/998/>
818. Kim, J. y Seidmann A. (1990). *A framework for the exact evaluation of expected cycle times in automated storage systems with full-turnover item allocation and random service requests*. Computers & Industrial Engineering, vol. 18(4): 601-612. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] doi>[10.1016/0360-8352\(90\)90018-H](https://doi.org/10.1016/0360-8352(90)90018-H)
819. Kim, K.Y. y Kim, K.H. (1997): *A routing algorithm for a single transfer crane to load export containers onto a containership*. Computers & Industrial Engineering, vol. 33 (3-4): 673-676. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835297002192>

-
820. Kim, K. H. y Bae, J. W. (1998). *Re-marshaling export containers in port container terminals*. Computers and Industrial Engineering vol. 35 (3-4): 655-658. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083529800182X>
821. Kim, K.H. y Kim, H.B. (1998). *The optimal determination of the space requirement and the number of transfer cranes for import containers*. Computers & Industrial Engineering, vol. 35 (3-4): 427-430. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835298001259>
822. Kim, K.H. y Bae, J.W. (1999). *A dispatching method for Automated Guided Vehicles to Minimize Delays of Containership Operations*. International Journal of Management Science, vol. 5(1): 1-25. Disponible en [fecha de acceso 19.02.2017] http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=E1MSAQ_1999_v5n1_1
823. Kim, K.H., y Kim, K.Y. (1999a). *An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals*. Transportation Science, vol. 33(1): 17-33. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/220412927_An_Optimal_Routing_Algorithm_for_a_Transfer_Crane_in_Port_Container_Terminals
824. Kim, K.H. y Kim, H.B. (1999b). *Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals*. International Journal of Production Economics vol. 59(1-3): 415-423. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527398000280>
825. Kim, K. H.; Park, Y. M. y Ryu, K.-R. (2000). *Deriving decision rules to locate export containers in container yards*. European Journal of Operational Research, vol. 124(1): 89-101. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799001162>
826. Kim, K.H. y Kim, H. (2002). *The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers*. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 36(9): 821-835. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261501000339>.
827. Kim, K. H.; Wang, S. J.; Park, Y.-M.; Yang C.-H. y Bae, J. W. (2002). *A simulation study on operation rules for automated container yards*. Proceedings of the 7th Annual International Conference on Industrial Engineering.

-
828. Kim, K.Y. y Kim, K.H. (2003) *Heuristic algorithms for routing yard-side equipment for minimizing loading times in container terminals*. Naval Research Logistics vol. 50(5): 498–514. Disponible bajo consulta en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/229888156_Heuristic_algorithms_for_routing_yard-side_equipment_for_minimizing_loading_times_in_container_terminals
829. Kim, K. H.; Lee, K. M. y Hwang, H., (2003). *Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals*. International Journal of Production Economics, vol. 84(3): 283-292. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527302004668>
830. Kim, K.H., y Moon, K. C. (2003). *Berth scheduling by simulated annealing*. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 37(6): 541-560. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00027-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00027-9).
831. Kim K. H. y Park K. T. (2003): *A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers*. European Journal of Operational Research, vol. 148(1): 92-101. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702003338>
832. Kim, K. H. y Bae, J. W. (2004). *A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals*. Transportation Science, vol. 38(2): 224-234. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1030.0082>
833. Kim, K.H.; Kang, J.S. y Ryu, K.R. (2004). *A beam search algorithm for the load sequencing of outbound containers in port container terminals*. OR Spectrum vol. 26(1): 93–116. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] DOI: 10.1007/s00291-003-0148-0
834. Kim, K.H. y Park, Y. M. (2004). *A crane scheduling method for port container terminals*. European Journal of Operational Research, vol. 156(3): 752-768. Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00133-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00133-4)
835. Kim, K. H. y Hong, G. P. (2006). *A heuristic rule for relocating blocks*. Computers and Operations Research, vol. 33(4): 940–954. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054804001959>
836. Kim, K.H.; Jeon, S.M. y Ryu, K.R. (2006). *Deadlock prevention for automated guided vehicles in automated container terminals*. OR Spectrum, vol. 28(4): 659–679. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-006-0055-2>

837. Kim, K. H. y Lee, J. S. (2006). *Satisfying constraints for locating export containers in port container terminals*. Lecture Notes in Computer Science 3982, pp: 564–573. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11751595_60
838. Kim, B.-I.; Koo, J. y Park, B. (2008) *A raw material storage yard allocation problem for a large-scale steelworks*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 41(9): 880–884. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] DOI: [10.1007/s00170-008-1538-x](https://doi.org/10.1007/s00170-008-1538-x)
839. Kim, K.H.; Park, Y.-M. y Jinm, M.-J. (2008). *An optimal layout of container yards*. OR Spectrum vol. 30(4): 675-695. Disponible en [fecha de acceso 20.02.2017] DOI: [10.1007/s00291-007-0111-6](https://doi.org/10.1007/s00291-007-0111-6)
840. Kimura T. y Ohson T. (1984). *A Diffusion Approximation for an M/G/m Queue with Group Arrivals*. Management Science, vol. 30(3): 381 - 388. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] <http://www.jstor.org/stable/2631810>
841. Kimura, T. (1991). *Refining Cosmetatos' approximation for the mean waiting time in the M/D/s queue*. Journal of Operational Research Society, vol. 42(7): 595-603. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] [doi:10.1057/jors.1991.119](https://doi.org/10.1057/jors.1991.119)
842. King, C.B. (1996). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceedings of the 28th Winter Simulation Conference. Editado por J. M. CIIarnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner, y J.J. Sulvain. Páginas: 569-574 Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/082.pdf>.
843. King, D.H.; Radomske, B.A. y Manocha, G.S. (1993). *Recent advances in simulation models for bulk terminal design*. Bulk Solids Handling 13(1): 23–27. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/295390299_Recent_advances_in_simulation_models_for_bulk_terminal_design
844. Kirkerud, B. (1989). *Object-Oriented Programming with SIMULA*. Addison-Wesley, Coleccion International Computer Science. 529 Páginas. ISBN-10: 0201175746 / ISBN-13: 978-0201175745.
845. Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D. y Vecchi, M.P. (1983). *Optimization by simulated annealing*. Science 220(4598): 671-680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://science.sciencemag.org/content/220/4598/671>

-
846. Kiviat, P. J. y Colker, A. (1964). *GASP-A General Activity Simulation Program*. RAND Corporation, Santa Monica, California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://www.rand.org/pubs/papers/P2864.html>.
847. Kiviat, P. J. (1966). *Introduction to the SIMSCRIPT II Programming Language*. RAND Corporation, Santa Monica, California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017] <http://www.rand.org/pubs/papers/P3314.html>.
848. Kiviat, P. J.; Villanueva, R. y Markowitz, H. M. (1968). *The SIMSCRIPT II programming language*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall. 386 Páginas. ISBN-10: 0138101760 e ISBN-13: 978-0138101763
849. Kiviat, P.J. (1968). *Simulation Programming Using SIMSCRIPT II*. RAND Corporation, Santa Monica, California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017] <http://www.rand.org/pubs/papers/P3861.html>.
850. Kiviat, P.J. y Villanueva, R. (1968). *The SIMSCRIPT II Programming Language: Reference Manual*. RAND Corporation, Santa Monica, California (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017] http://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM5776.html.
851. Kiviat, P.; Villanueva, R., Markowitz, H. y Rusell, E.C. (1973). *SIMSCRIPT II.5 programming language*. La Jolla CA: Editado por Consolodated Analysis Centers Inc. (CACI). 441 páginas. Re-editado en Junio 1983. ISBN 9996806332 / ISBN-13 9789996806339
852. Kleinen, J. (1974) (vol. 1) y (1975) (vol. 2). *Statistical techniques in simulation*. New York: Marcel Dekker. 775 Páginas. ISBN-10: 0824772202 / ISBN-13: 978-0824772208.
853. Knapp, G.M. y Wang, H.P: (1992). *Modeling of automated storage/retrieval systems using Petri nets*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 11(1): 20-29. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(92\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0278-6125(92)90014-7)
854. Knuth, D.E. (1980): *Algorithms in modern mathematics and computer science*. Stanford Department of Computer Science Report (1980). Consultado en Knuth, D.E. (2005) "Algorithms in Modern Mathematics and Computer Science" - Volumen 122 de Lecture Notes in Computer Science, pp: 82-99. ISBN: 978-3-540-11157-3.
855. Ko, J.-M. (1996). *The path planning and prototype design of an AGV*. Master Thesis, National Cheng University (Taiwan).

856. Kobayashi, K. (2010). *A Linear Approximation of the Value Function of an Approximate Dynamic Programming Approach for the Ship Scheduling Problem*. Lecture Notes in Computer Science – Proceedings of the 4th International Conference on Learning and Intelligent Optimization, 18-22 de Enero de 2010, Venecia (Italia). Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] DOI: [10.1007/978-3-642-13800-3_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-13800-3_14)
857. Kobayashi, K. y Kubo, M. (2010). *Optimization of oil tanker schedules by decomposition, column generation, and time-space network techniques*. Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics vol. 27(1):161-173. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] DOI: [10.1007/s13160-010-0008-7](https://doi.org/10.1007/s13160-010-0008-7)
858. Koch, D.B. (2007). *PortSim – A Port Security Simulation and Visualization Tool*. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge (Estados Unidos). Proceedings of the 41st Annual IEEE Carnahan Conference on Security Technology (ICCST'2007), 8-11 de Octubre de 2007 Ottawa, Ontario (Canada). 8 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 27.09.2016] http://web.ornl.gov/~ko5/PortSim_Paper.pdf
859. Koenigsberg, E. y Lam, R. (1976). *Cyclic queue models of fleet operations*. Operations Research, vol. 24(3): 516-529. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <https://doi.org/10.1287/opre.24.3.516>
860. Koh, P.-H.; Goh, J. L.-K.; Ng H.-S. y Ng, H.C. (1994a). *Using simulation to preview plans of a container port operations*. Proceeding of the 26th Winter Simulation Center (1994). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A: Sadowski y A.F. Seila, pp: 1109-1115. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0162.pdf
861. Koh, H.; Tan, S.L.; Goh, L.K y Ng, K.L. (1994b). *A decision support system for container port operations*. New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications (1994), pp: 451–457
862. Kondratowicz, L. J. (1990). *Simulation methodology for intermodal freight transportation terminals*. Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International vol. 51(1): 49-59. (1990). DOI: 10.1177/003754979005500110. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/238834970_Simulation_methodology_for_intermodal_freight_transportation_terminals
863. Kondratowicz, L. J. (1992). *Methodological solutions for increased efficiency of modelling and simulation of seaports and inland freight terminals*. Maritime Policy

- Management 19(2): 157-64. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] DOI: 10.1080/03088839200000022
864. König, T.M.; Klüpfel, H. y Schreckenberg, M. (2002). *Assesment and Analisys of Evacuation Processes on Passangers Ships by Microoscopic simulation*. Pedrestian and evacuation Dynamics. (Editado por Michael Schreckenberg y Som Deo Sharma). Springer-Verlag - Berlin Heidelberg, pp: ISBN 978-3-642-07658-9 (452 Páginas), pp: 297-302. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/235741952_Assessment_and_Analysis_of_Evacuacion_Processes_on_Passenger_Ships_by_Microscopic_Simulation
865. Konings, R. (2007). *Opportunities to improve container barge handling in the port of rotterdam from a transport network perspective*. Journal of Transport Geography, vol. 15(5): 443–454. Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/222632948_Opportunities_to_improve_container_barge_handling_in_the_port_of_Rotterdam_from_a_transport_network_perspective
866. Kontovas, C.A., Psaraftis, H.N., Ventikos, N.P., 2010. *An empirical analysis of IOPCF oil spill cost data*. Marine Pollution Bulletin 60(9): 1455-1466. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.05.010. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/44667154_An_empirical_analysis_of_IOPCF_oil_spill_cost_data
867. Koo, P.-H.; Lee, W.S.; Jang, D.W. (2004) *Fleet sizing and vehicle routing for container transportation in a static environment*. Primera publicación en: OR Spectrum, vol. 26(2): 193-209. y segunda publicación en: Container Terminals and Automated Transport Systems 2005, pp: 123-139.
868. Kordić, S.; Dragović, B.; Davidović, T. y Kovač, N. (2012). *A Combinatorial Algorithm for Berth Allocation Problem in Container Port*. Proceedings of International Association of Maritime Economists Conference, Taipei, 2012. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/272833290_A_Combinatorial_Algorithm_for_Berth_Allocation_Problem_in_Container_Port
869. Kordić, S.; Dragović, B.; Davidović, T. y Kovač, N. (2016) *Combinatorial Approach to Exactly Solvig Discrete and Hybrid Berth Allocation Problem*. Applied Mathematical Modelling 40(21-22): 8952-8973 (May 2016). Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017]

- <https://www.researchgate.net/publication/303696390> *Combinatorial Approach to Exactly Solving Discrete and Hybrid Berth Allocation Problem*
870. Kordić, S.; Kovač, N. y Davidović, T. (2015). *Divide and conquer approach to discrete berth allocation problem*. Naval Academy Scientific Bulletin, vol.XVIII(2): 307-316. Publicado por Naval Academy Press, Constanta, Romania. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] <https://www.researchgate.net/publication/285578942> *Divide and Conquer Approach to Discrete Berth Allocation Problem*
871. Koren, Y. y Borenstein (1991). *Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 9-11 de abril de 1991, Sacramento (California, Estados Unidos), pp: 1398-140. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/738a/a7b9fda536e7d603e9d84725f38f96b50150.pdf>
872. Korn, G. A., y Wait J. V. (1978). *Digital continuous system simulation*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 320 páginas. ISBN-10: 013212274X / ISBN-13: 978-0132122740.
873. Korsvik, J. E. y Fagerholt, K. (2010). *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling with flexible cargo quantities*. Journal of Heuristics 16(2): 117-137. doi:10.1007/s10732-008-9092-0. Disponible bajo petición [fecha de acceso 25.10.2016] <https://www.researchgate.net/publication/220403498> *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling with flexible cargo quantities*
874. Korsvik, J.E; Fagerholt, K. y Laporte, G. (2009). *Tabu search heuristic for ship scheduling problems*. Working Paper. Recurso no publicado. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <https://documents.epfl.ch/users/b/bi/bierlair/dropbox/TRISTAN/091Korsvik.pdf>
875. Korsvik, J. E.; Fagerholt, K. y Laporte, G. (2010) *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling*. Journal of the Operational Research Society 61, pp: 594-603. DOI: 10.1057/jors.2008.192 Disponible bajo petición [fecha de acceso 25.10.2016] <https://www.researchgate.net/publication/220636495> *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling*
876. Korsvik, J.E; Fagerholt, K. y Laporte, G. (2010). *A tabu search heuristic for ship routing and scheduling*. Journal of the Operational Research Society, vol. 61(4): 594–603. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <https://link.springer.com/article/10.1057%2Fjors.2008.192>

877. Köse, E.; Başar, E.; Demirci, E.; Güneroğlu, A. y Erkebay, Ş. (2003). *Simulation of marine traffic in Istanbul Strait*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 11(7-8): 597-608. 2003. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222369240_Simulation_of_marine_traffic_in_Istanbul_Strait
878. Koseler, S. (2008). *Intermodal Logistics System Simulation Model & the Empty Container Flows*. Tesis Doctoral. Universidad de Bergen (Alemania). (Director de Tesis: Prof. Paal Davidsen - System Dynamics Group – Departamento de Geografía). 169 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/3311/50101879.pdf?sequence=1>
879. Kowalski, R. A. (1973). *Predicate Logic as a Programming Language*. Memo 70, Department of Artificial Intelligence, Edinburgh University. 1973. También disponible en Proceedings IFIP Congress, Stockholm, North Holland Publishing Co., 1974, pp: 569–574. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://www.doc.ic.ac.uk/~rak/papers/IFIP%2074.pdf>.
880. Kozan, E. (1994). *Analysis of the economic effects of alternative investment decisions for seaport systems*. Transportation Planning and Technology, vol. 18(3): 239-248. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: 10.1080/03081069408717546.
881. Kozan, E. (1997a). *Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container Terminals*. Transport. Plan. Technol, vol. 20(3): 235–248. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/239469041_Comparison_of_analytical_and_simulation_planning_models_of_seaport_container_terminals
882. Kozan, E. (1997b). *Increasing the operational efficiency of container terminals in Australia*. The Journal of Operational Research Society, vol. 48(2): 151-161. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] doi:10.1057/palgrave.jors.2600348
883. Kozan, E. y Preston, P. (1999). *Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals*. International Transactions of Operational Research, vol. 6(1): 311–329. (1999). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/227890776_Genetic_algorithms_to_schedule_container_transfers_at_multimodal_terminals
884. Kozan, E. (2000). *Optimising container transfers at multimodal terminals*. Mathematical and Computer modelling, vol. 31(1): 235-243. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016]

- <https://www.researchgate.net/publication/222586695> *Optimising container transfers at multimodal terminals*
885. Kozan, E. (2006). *Optimum capacity for intermodal container terminals*. Transportation Planning and Technology, Vol. 29(6): 471-482. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 02.11.2016] <https://www.researchgate.net/publication/27480826> *Optimum Capacity for Intermodal Container Terminals*
 886. Kozan, E. y Preston, P. (2006). *Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals*. Operacional Research Spectrum, vol. 28(4): 519–537. DOI: 10.1007/978-3-540-49550-5_5. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] <https://www.researchgate.net/publication/27470508> *Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals*
 887. Krah, D. (2012). *ExtendSIM: A History of Innovation*. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. Editado por C. Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, y A.M. Uhrmacher. 8 Páginas . Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016] <http://informatics-sim.org/wsc12papers/includes/files/vdrp101.pdf>
 888. Krah, D. y Nastasi, A. (2014). *Reliability modelling with ExtendSIM*. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Editado por A. Tol, S. Y. Diallo, I. O. Ryzhov, L. Yilmaz, S. Buckley, y J. A. Miller. Páginas: 4219-4225. Disponible en [fecha de acceso 16.06.2017] <http://informatics-sim.org/wsc14papers/includes/files/476.pdf>
 889. Kristensen, B.B.; Madsen, O.L.; Møller-Pedersen, B. y Nygaard, K (1976). *BETA Project Working Notes 1-8*. Norwegian Computing Center, Oslo and Computer Science Department, Aarhus University, Aarhus, pp: 1976–1982.
 890. Krogh, B.H. y Thorpe, C.E. (1986). *Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicles*. Proceedings of 1986 International Conference on Robotics and Automation (ICRA '86), April 1986, vol. 3: 1664-1669. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: 10.1109/ROBOT.1986.1087444
 891. Kruskal, J.B. (1959). *On the shortest spanning subtree and the traveling salesman problem*. Proceedings of the American Mathematical Society, vol. 7 (1956): 48–50. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] http://www.jstor.org/stable/2033241?seq=1#page_scan_tab_contents
 892. Kruskal, J. B. (1964). *Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis*. Psychometrika, vol. 29(1): 1–27. doi:10.1007/BF02289565

-
893. Kuhn Jr., J. R.; Courtney, J. F.; Morris, B. y Tatara, E.R. (2010). *Agent-Based Analysis and Simulation of the Consumer Airline Market Share for Frontier Airlines*. Knowledge-Based Systems vol. 23(8): 875-882. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/223397698_Agent-based_analysis_and_simulation_of_the_consumer_airline_market_share_for_Frontier_Airlines
894. Kulak, O.; Polat, O. y Guenther, H.-O. (2008). *Performance Evaluation of Container Terminal Operations*. 3rd German - Korean Workshop on Container Terminal Management, University of Bremen, 27-31 Agosto 2008, Bremen, Alemania. 9 páginas. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] <http://opolat.pau.edu.tr/docs/Performance%20Evaluation%20of%20Container%20Terminal%20Operations.PDF>
895. Kumar, M. y Omkar, S.N. (2008). *Optimization of yard crane scheduling using particle swarm optimization with genetic algorithm operators (PSOGAO)*. Journal of Scientific & Industrial Research, vol. 67(5): 335-339. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017]. https://www.researchgate.net/publication/28604881_Optimization_of_yard_crane_scheduling_using_particle_swarm_optimization_with_genetic_algorithm_operators_PSOG_AO
896. Kuo, T.C.; Huang, W.C.; Wu, S.-C. y Cheng, P.L. (2006). *A case study of interarrival time distributions of container ships*. Journal of Marine Science and Technology, vol. 14(3): 155-164. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/14-3/155-164.pdf>
897. Kuo, P. -H., Krishnamurthy, A. y Malmborg, C. J. (2007). *Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies*. Applied Mathematical Modelling, vol. 31(10): 2332-2346. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/222789540_Design_models_for_unit_load_storage_and_retrieval_systems_using_autonomous_vehicle_technology_and_resource_conserving_storage_and_dwell_point_policies
898. Kuo, P.H., Krishnamurthy, A. y Malmborg, C.J. (2008). *Performance modelling of autonomous vehicle storage and retrieval systems using class-based storage policies*. International Journal of Computer Applications in Technology, vol. 31(3-4): 238-248. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] doi>10.1504/IJCAT.2008.018160

899. Kuwahara, N.; Bajay, S.V. y Castro, L.N. (2000). *Liquefied natural gas supply optimization*. Energy Conversion and Management, vol. 41(2): 153-161. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001053>
900. Kwok, A. y Norrie, D. (1993). *Intelligent agent systems for manufacturing applications*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 4(4): 285-293. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00124141>
901. Lagoudis, I.N. y Platis, A.N. (2009). *Using birth-and-death theory for container terminal strategic investment decisions*. International Journal of Decision Sciences, Risk and Management, vol. 1(1/2): 81-103. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <https://doi.org/10.1504/IJDSRM.2009.027248>
902. Lai, K.K. y Shih, K. (1992). *A study of container berth allocation*. Journal of Advanced Transportation, vol. 26(1): 45-60. Disponible en [fecha de acceso 26.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/229801596_A_study_of_container_berth_allocation
903. Lai, K. K. y Lam, K., (1994). *A study of container yard equipment allocation strategy in Hong Kong*. International Journal of Modeling & Simulation, vol. 14(3): 134-138. Disponible en [fecha de acceso 26.01.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02286203.1994.11760228>
904. Lai, K. K.; Leung, J. W., (1996). *Analysis of yard crane deployment strategies in a container terminal*. Proceedings of the International Conference on Computer and Industrial Engineering, pp: 1187-1190.
905. Lai, G.; Wang, M.X.; Kekre, S.; Scheller-Wolf, A. y Secomandi, N. (2011). *Valuation of Storage at a Liquefied Natural Gas Terminal*. Operations Research 59(3): 602-616. DOI: 10.2307/23013130. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/220244362_Valuation_of_Storage_at_a_Liquefied_Natural_Gas_Terminal
906. Lai, C.H. y Sun, P.Y. (2010). *Queuing pricings to bulk carriers at the anchorage*. Asian Transport Studies, vol. 1(1): 62-75. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/eastpro/2009/0/2009_0_33/_pdf
907. Lajjam, A.; El Merouani, M.; Medouri, A. y Tabaa, Y. (2013). *Mathematical model for Quay Crane Scheduling Problem with spatial constraints*. International Journal of Innovation and Applied Studies 4(3): 547-551. Disponible en [fecha de acceso

- 28.01.2017]
<https://www.researchgate.net/publication/258519667> Mathematical model for Quay Crane Scheduling Problem with spatial constraints
908. Lake, M.W. (2014). *Trends in archaeological simulation*. Journal of Archaeological Method and Theory, vol. 21(2): 258–287. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/s10816-013-9188-1>
909. Lalla-Ruiz, E.; Melian, B. y Moreno-Vega, J.M. (2012). *Artificial intelligence hybrid heuristic based on tabu search for the dynamic berth allocation problem*. Engineering Applications of Artificial Intelligence 25(6): 1132-1141. DOI: 10.1016/j.engappai.2012.06.001. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <https://www.researchgate.net/publication/236236639> Artificial intelligence hybrid heuristic based on tabu search for the dynamic berth allocation problem
910. LaLonde, W. (1994). *Discovering Smalltalk*. Benjamin/Cummings Series in Object-Oriented Software Enginee - 1st Edition publicado por Addison-Wesley Professional; (Enero 1994). 576 páginas. ISBN-13: 978-0805327205.
911. Lam, S.-W.; Lee, L.-H. y Tang L.-C. (2007). *An approximate dynamic programming approach for the empty container allocation problem*. Transportation Research Part C 15, vol. 15(4): 265–277. Disponible en [fecha de última descarga 10.12.2016] <https://www.researchgate.net/publication/222816130> An approximate dynamic programming approach for the empty container allocation problem
912. Lam, J.S.L. y Yap, W.Y. (2011). *Dynamics of liner shipping network and port connectivity in supply chain systems: analysis on East Asia*. Journal of Transport Geography – vol. 19(6): 1272–1281. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.06.007. Disponible en [fecha de acceso 10.12.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692311001013>
913. Lambert, D.M., 2001. *The supply chain management and logistics controversy* Handbook of Logistics and Supply Chain management (Editado por A.M. Brewer, J.K. Button y D.A. Hensher, ed.), Oxford Pergamon, pp: 99-125. DOI 10.1108/9780080435930-007 Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/9780080435930-007>
914. Lan, L.W. y Teng, J.Y. (1990). *Applications of the M/M/S Queuing System to Determine the Optimal Number of Berths*. Journal of Chinese Institution of Civil and Hydraulic Engineers, vol. 2(4): 369-375.

-
915. Land, A:H. y Doig, A:G. (1960). *An automatic method of solving discrete programming problems*. *Econometrica*. 28(3). pp: 497–520. Disponible en [fecha de acceso 12.12.2016] [doi:10.2307/1910129](https://doi.org/10.2307/1910129).
916. Lane D.C. (2007). *The Power of the Bond Between Cause and Effect (Full Version): Jay Wright Forrester and the Field of System Dynamics*. *System Dynamics Review*, vol. 23 (2-3): 95-118.
917. Lara, J.; Levendovszky, T.; Mosterman, P. y Vangheluwe H. (2008). *Second International Workshop on Multi-Paradigm Modeling: Concepts and Tools*. International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS2007) Editado por H. Giese, Models in Software Engineering, Lecture Notes in Computer Science, vol.5002. Springer, Berlin, Heidelberg, pp: 237-246: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-69069-6. [doi>10.1007/978-3-540-69073-3_25](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69073-3_25).
918. Lattila, O.L. y Saranen, J. (2011). *Múltimodal transportation risk in Gulf of Finland Region*. *World Review of Intermodal Transportation Research*, vol. 3(4): 376-394. Disponible en [fecha de acceso 12.12.2016] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/WRITR.2011.041719>
919. Lau, H. y Zhao, Y. (2008): *Integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals*. *Annals of Operations Research* March 2008, vol. 159(1): 373-394. Disponible en [fecha de acceso 12.12.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552730700237X>
920. Lavery, E., Beaverstock, M.; Greenwood, A.; Nordgren, W. y Warr S. (2011). *Applied Simulation Modeling and Analysis using FlexSim*. (3rd Edition 3 de enero de 2011) Publicado por FlexSim Software Products, Inc., Canyon Park Technology Center, Building A Suite 2300, Orem, UT 84097, Estados Unidos. 539 páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <https://www.amazon.es/Applied-Simulation-Modeling-Analysis-FlexSim-ebook/dp/B0096CP1L6>
921. Law, A.M y McComas, M.G. (1996). *Experfit: Total support for simulation input modeling*. . Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference. Editado por J.M. Charnes, D. J. Morrice, D.T. Brunner y J.J. Swain. Páginas 588-593. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/086.pdf>
922. Law, A.M. y Larmeu C.S. (1984). *SIMSCRIPT II-5*. CACI Product Co. La Jolla, California (Estados Unidos).

-
923. Law, A.M. (2014): *Simulation Modeling and Analysis*. 5^a Edition McGraw-Hill, January 2014, 804 páginas (ISBN-13: 978-0073401324 ISBN-10: 0073401323)
924. Law, A.W. (2015). *Discrete Event and Agent Based simulation and where to use each*. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference. Editado por L. Yilmaz, W. K. V. Chan, I. Moon, T. M. K. Roeder, C. Macal, y M. D. Rossetti. 1866 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc15papers/193.pdf>
925. Lawrence, P. (1973). *A computer simulation model for port planning*. International Journal of Physical Distribution, vol. 4(1): 26–39.
926. LBR Staff Writer (2010) (noticia en línea publicada el 2 de febrero de 2010). *Jade To Deploy JMT In New GulfTainer Terminal*. LBR Transport Infraestructure. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] http://transportinfrastructure.logistics-business-review.com/news/jade_to_deploy_jmt_in_new_gulftainer_terminal_100203
927. LeBaron, B. (2005). *Agent-based computational finance*. International Business School, Brandeis University; Waltham, Massachusetts (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 18.10.2016] <http://people.brandeis.edu/~blebaron/wps/hbook.pdf>
928. Lee, P.-S. y Wang, L.-L. (1994). *Collision avoidance by fuzzy logic control for automated guided vehicle navigation*. Journal of Robotic Systems, vol. 11(8): 743-760. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.4620110807/abstract>
929. Lee, H.L.; Pinto, J.N.; Grossmann, I. E. y Park, S- (1996). *Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil un-loading with inventory management*. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 35(5): 1630–1641. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/231391639_Mixed-Integer_Linear_Programming_Model_for_Refinery_Short-Term_Scheduling_of_Crude_Oil_Unloading_with_Inventory_Management
930. Lee, H.L.; Padmanabhan, V. y Whang, S. (1997). *Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect*. Management Science, vol. 43(4): 546-558. Disponible en [fecha de acceso 12.10.2016] <http://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/mnsc.1040.0266>.

-
931. Lee, T.-W.; Park, N.-K. y Lee, D.-W. (2003). *A simulation study for the logistics planning of a container terminal in view of SCM*. Maritime Policy & Management, Vol. 30(3): 243-254. Disponible bajo petición en (fecha de acceso 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/248989141_A_Simulation_Study_for_the_Logistics_Planning_of_a_Container_Terminal_in_View_of_SCM
932. Lee, L.H., E.P. Chew, K.C. Tan y Y.B. Han. (2006). *An optimization model for storage yard management in transshipment hubs*. OR Spectrum, vol. 28(4): 539-561. Disponible en [fecha de acceso 14.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-006-0045-4>
933. Lee, D.-H.; Cao, Z. y Meng, Q. (2007). *Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm*. International Journal of Production Economics, vol. 107(1): 115–124. Disponible en [fecha de acceso 14.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527306002155>
934. Lee, S.-Y. y Cho, G.S. (2007). *A Simulation Study for the Operations Analysis of Dynamic Planning in Container Terminals Considering RTLS*. Proceedings of the Innovative Computing, Information and Control, International 2007 (ICICIC'2007). 5-7 Septiembre de 2007, pp: 116, ISBN: 0-7695-2882-1. doi:10.1109/ICICIC.2007.89. Disponible en [fecha de acceso 14.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/4310238_A_Simulation_Study_for_the_Operations_Analysis_of_Dynamic_Planning_in_Container_Terminals_Considering_RTLS
935. Lee, Y. y Hsu, N.-Y. (2007). *An optimization model for the container pre-marshalling problem*. Computers and Operations Research, vol. 34(11): 3295-3313. Disponible en [fecha de acceso 14.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505480500403X>
936. Lee, D.H., Wang, H., y Miao, L. (2008). *Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review., vol. 44(1): 124–135. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222539986_Quay_crane_scheduling_with_no_n-interference_constraints_in_port_container_terminals
937. Lee, Y. y Chao, S.-L. (2009). *A neighborhood search heuristic for pre-marshalling export containers*. European Journal of Operational Research, vol. 196(2): 468-475. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221708002865>

-
938. Lee, Y. y Chen, C.-Y. (2009). *An optimization heuristic for the berth scheduling problem*. European Journal of Operational Research, 196(2): 500-508. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.021>.
939. Lee, D.H.; Cao, J. X.; Shi, Q. y Chen, J. H. (2009a). *A heuristic algorithm for yard truck scheduling and storage allocation problems*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 45(5): 810-820. (2009). DOI: 10.1016/j.tre.2009.04.008 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 14.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222979300_A_heuristic_algorithm_for_yard_truck_scheduling_and_storage_allocation_problems
940. Lee, N.; Lau, H. y Ko, A. (2009b). *An Immune Inspired Algorithm for Solving Dynamic Vehicle Dispatching Problem in a Port Container Terminal*. Proceedings of the 8th Artificial Immune Systems Conference, ICARIS 2009, 9-12 de Agosto de 2009, York (Reino Unido). DOI: 10.1007/978-3-642-03246-2_30. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 14.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/221506753_An_Immune_Inspired_Algorithm_for_Solving_Dynamic_Vehicle_Dispatching_Problem_in_a_Port_Container_Terminal
941. Lee, H.L. (2010). *Taming the bullwhip*. Journal of Supply Chain Management, vol. 46(1): Página 7. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <https://www.deepdyve.com/lp/wiley/taming-the-bullwhip-E87Fc1sSnC>.
942. Lee, Y. y Lee, Y.-J. (2010). *A heuristic for retrieving containers from a yard*. Computers and Operations Research, vol. 37(6): 1139-1147. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809002433>
943. Lee, D.H.; Jin, J.G: y Chen, J.H. (2011). *Integrated Bay Allocation and Yard Crane Scheduling Problem for Transshipment Containers*. Marine Transportation and Marine Terminal Operations, vol. 2222(2011): 63-71. Disponible en [fecha de acceso 14.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/259572416_Integrated_Bay_Allocation_and_Yard_Crane_Scheduling_Problem_for_Transshipment_Containers
944. Lee, D.H.; Jin, J.G: y Chen, J.H. (2012). *Terminal and yard allocation problem for a container transshipment hub with multiple terminals*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, vol. 48(2): 516-528. DOI: 10.1016/j.tre.2011.09.004. Disponible en [fecha de acceso 14.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/251670898_Terminal_and_yard_allocation_problem_for_a_container_transshipment_hub_with_multiple_terminals Legato P. y Mazza,

- R. (2001). *Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation*. European Journal Operational Research 133(3): 537–547. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00200-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00200-9)
945. Legato P. y Mazza, R. (2001). *Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation*. European Journal Operational Research 133(3): 537–547. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00200-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00200-9)
946. Legato, P. y Mazza, R. (2001). *Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation*. European Journal of Operational Research, vol. 133(3): 537-547. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00200-9)
947. Legato, P. y Monaco, M.F. (2004). *Human resources management at a marine container terminal*. European Journal of Operational Research vol. 156(3): 769-781. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00134-6. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/4871597_Human_resources_management_at_a_marine_container_terminal
948. Legato, P.; Mazza, R.M. y Trunfio, R. (2008). *Simulation-based optimization for the quay crane scheduling problem*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, pp: 2717-2725. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc08papers/342.pdf>
949. Legato, P.; Canonaco, P. y Mazza, R.M. (2009). *Yard Crane Management by Simulation and Optimisation*. Maritime Economics & Logistics, vol. 11(1): 36-57. DOI: 10.1057/mel.2008.23. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/24110600_Yard_Crane_Management_by_Simulation_and_Optimisation
950. Legato, P.; Trunfio, R. y Meisel, F. (2011). *Modeling and solving rich quay crane scheduling problems*. Computers & Operations Research, vol. 39(9): 2063–2078. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811002875>
951. Lehmann, M.; Grunow, M. y Günther, H.-O. (2006). *Deadlock handling for real-time control of agvs at automated container terminals*. OR Spectrum, 28(4): 631–657. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-006-0053-4>

-
952. Leitão, P. (2009). *Agent-based distributed manufacturing control: A stateof- the-art survey*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 22(7): 979–991. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2008.09.005>
953. Lerher, T. (2013). *Modern automation in warehousing by using the shuttle-based technology*. Incluido en Automation Systems of the 21st Century: New Technologies, Applications and Impacts on the Environment & Industrial Processes, Nova Science Publishers, New York (Estados Unidos). Editado por Arent, D., Freebush, M., pp: 51-86.
954. Lerher, T., Edl, M. y B. Rosi, B. (2014). *Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 70(1-4): 97-115 Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] [doi:10.1007/s00170-013-5253-x](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5253-x)
955. Lerher, T., Ekren, Y.B., Sari, Z. y Rosi, B. (2015). *Simulation analysis of shuttle based Storage and retrieval systems*. International Journal of Simulation Modelling, vol. 14(1): 48-59. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] http://www.ijsimm.com/Full_Papers/Fulltext2015/text14-1_48-59.pdf
956. Lerher, T.; Šraml, M., Borovinšek, M. y Potrč, I: (2012). *Multi-objective optimization of automated storage and retrieval systems*. Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Logistics, ICIL 2012, Zadar (Croacia). Después publicado en Annals of Faculty Engineering Hunedoara, vol. XI(2013): 187-194. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2013/ANNALS-2013-1-26.pdf>
957. Leung, S.C.H.; Lai, K. K. y Wu, Y. (2003). *Stochastic Model for Dynamic Empty Container Allocations*. Proceedings of the IEMS, Vol. 2(2): 113-120.
958. Lewis, T. G. y Smith, B. J. (1979). *Computer principles of modelling y simulation*. Boston: Houghton y Mifflin. 275 Páginas. ISBN-10: 0395271436 / ISBN-13: 978-0395271438.
959. Leyk, S.; Binder, C. R. y Nuckols, J. R. (2009). *Spatial Modeling of Personalized Exposure Dynamics: The Case of Pesticide Use in Small-Scale Agricultural Production Landscapes of the Developing World*. International Journal of Health Geographics, vol. 8(17): 1-16. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] link.springer.com/content/pdf/10.1186/1476-072x-8-17.pdf

-
960. Li, H.; Iakovou, E. y Douligeris, C. (1996). *Strategic planning model for marine oil transportation in the Gulf of Mexico*. Transportation Research Record, vol. 1522(1): 108–115. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.3141/1522-15](https://doi.org/10.3141/1522-15)
961. Li, C.-L. y Vairaktarakis, G. L. (2001). *Loading and unloading operations in container terminals*. Technical Memorandum 745, Case Western Reserve University, Weatherhead School of Management, Department of Operations, (2001). 24 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2016] <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/1831/1/39%20Final-Version.pdf>.
962. Li, C.-L. y Vairaktarakis, G. L. (2004). *Loading and unloading operations in container terminals*. IIE Transactions, vol. 36(4): 287-297. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2016] https://www.researchgate.net/publication/47870170>Loading_and_unloading_operations_in_container_terminals
963. Li, W.F., Li, B., y Zhang, Y. (2008). *Container terminal scheduling and decision-making using simulation based optimization and business intelligence*. Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2008), 5 de Agosto de 2008; Takamatsu(Japón). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 02.11.2016] DOI: [10.1109/ICMA.2008.4798904](https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798904)
964. Li, B., Li, W.F. y Voss, S. (2009). *Modeling container terminal scheduling systems as hybrid flow shops with blocking based on attributes*. En “Logistik Management”, editado por S. Voß, J. Pahl y S. Schwarze, pp: 413-434. Berlin: Springer-Verlag. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] DOI: [10.1007/978-3-7908-2362-2_21](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2362-2_21)
965. Li, G. (2010). *Agent-Based Container Terminal Optimisation*. Tesis para la obtención del grado de *Master of Applied Science* en la Universidad de Otago (Dunedin, Nueva Zelanda) (dirigido por Pr. Michael Winikoff). Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <https://ourarchive.otago.ac.nz/bitstream/handle/10523/1773/Guannan%20LiMasterthesis.pdf;sequence=1>
966. Li, B. y Li, W.-f. (2010). *Modelling and Simulation of Container Terminal Logistics systems using Harvard Architecture and Agent-Based Computing*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, y E. Yücesan, pp: 3396-3410. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/314.pdf>

-
967. Li, J.; Chen, Y.; Liu, S. y Sun, G. (2010a). *Port supply chain simulation based on system dynamics method*. Proceedings of the 2nd Conference on vol. 4(1): 428-432. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] [https://www.researchgate.net/publication/251923481 Port supply chain simulation based on system dynamics method](https://www.researchgate.net/publication/251923481_Port_supply_chain_simulation_based_on_system_dynamics_method)
968. Li, Q.; Udding, J. T. y Pogromsky, A. Y. (2010b). *Modeling and control of the AGV system in an automated container terminal*. In Proceedings of the AsiaMIC 2010, Phuket (Tailandia). Disponible en [fecha de acceso 19.02.2017] <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12192.pdf>
969. Li, D. y Wang, X. (2012). System Dynamics Simulation Model for Port Economy Analysis. Proceedings of the 6th International Conference on Management Science and Engineering Management (ICMSEM2012). Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 185(1): 475-482. 11-14 de Noviembre de 2012, Islamabad (Pakistán). Editores X.Jiuping, Y.Masoom y L.Benjamin. Springer London. Disponible en [fecha de acceso 19.02.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4471-4600-1_41
970. Li, W.; Goh, M.; Wu, Y.; Petering, M. E. H.; de Souza, R., y Wu, Y. C. (2012). *A continuous time model for multiple yard crane scheduling with last minute job arrivals*. International Journal of Production Economics, vol. 136(2): 332-343. Disponible en [fecha de acceso 19.02.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311005366>
971. Li, L.; Negenborn, R.R. y Schutter, B.D. (2014). *Multi-agent cooperative transport planning of intermodal freight transport*. Proceedings of the 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2014), 8-11 de OCTUBRE DE 2014, Qingdao (China) pp: 2465–2471. DOI: [10.1109/ITSC.2014.6958085](https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6958085)
972. Li, L.; Negenborn, R.R. y Schutter, B.D. (2016). *Distributed model predictive control for cooperative synchromodal freight transport*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (artículo aceptado y en impresión, disponible online desde 09.09.2016). Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] <http://doi.org/10.1016/j.tre.2016.08.006>
973. Liang, C., Huang, Y. y Yang, Y. (2009). *A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning*. Computer Industrial Engineering vol. 56(3): 1021–1028. Disponible en [fecha de acceso 30.01.2017] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835208002039?np=y&npKey=a_fcbbafdc253f20933f23a5f533f6a993be2a40e01e0b268d97f1855b5423411

-
974. Liggett R.S. (2000). *Automated facilities layout: past, present and future*. Automation in Construction, vol. 9(2): 197-215. Elsevier Science. Disponible en [fecha de acceso 30.01.2017] <http://users.metu.edu.tr/baykan/arch467/Liggett00.pdf>
975. Ligteringen, H. (2000). *Ports and Terminals – Lecture notes*. CTwa4330-5306, Departamento de Ingeniería Hidráulica – Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias. Delft University of Technology, Delft. Disponible en [fecha de acceso 30.01.2017] [uuid:aa681510-e90c-40ba-b7f6-fa86d242c315](http://www.tue.nl/uuid:aa681510-e90c-40ba-b7f6-fa86d242c315)
976. Lilegdon, W.R.; Martin, D.L. y Pritsker, A.A.B. (1994). *FACTOR/AIM: a manufacturing simulation system*. SIMULATION, 62(6): 367-372. Disponible en [fecha de acceso 30.01.2017] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979406200603>
977. Lim, A. (1998). *The berth planning problem*. Operations Research Letters, vol. 22(2): 105-110. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637798000108>
978. Lim, A. (1999). *An effective ship berthing algorithm*. Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99). 31 de julio – 6 de agosto de 1999, Estocolmo (Suecia), vol. 1(1): 594-599. D. Thomas Ed. (San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers). Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220812073_An_Effective_Ship_Berthing_Algorithm.
979. Lim, J.K.; Kim, K.H.; Yoshimoto, K y Lee, J.H (2003). *A dispatching method for automated guided vehicles by using a bidding concept*. OR Spectrum vol. 25(1): 25–44. Disponible en [fecha de acceso 26.01.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-26686-0_14
980. Lim, A.; Rodrigues, B.; Xiao, F. y Zhu, Y. (2002a). *Crane Scheduling Using Tabu Search*. Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2002), 4-6 de noviembre de 2002, Washington DC (Estados Unidos). DOI: 10.1109/TAI.2002.1180799. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/221417752_Crane_Scheduling_Using_Tabu_Search
981. Lim, A.; Rodrigues, B. y Zhu, Y. (2002b). *Crane scheduling using SWO with local search*. Proceedings of 4th Asia-Pac Conference on Simulated Evolution and Learning (SEAL 2002), 18-22 de noviembre de 2002, Singapore (Singapore), pp: 647-651.

- Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://repository.ust.hk/ir/Record/1783.1-9229>
982. Lim, A.; Rodrigues, B.; Xiao, F. y Zhu, Y. (2004a). *Crane scheduling with spatial constraints*. Naval Research Logistics, vol. 51(3): 386–406. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/2925843_Crane_Scheduling_with_Spatial_Constraints?ev=prf_pub
983. Lim, A.; Rodrigues, B. y Zhou, X. (2004b). *Solving the Crane Scheduling Problem Using Intelligent Search Schemes*. Lecture Notes in Computer Science 3258, pp: 747-751 (September 2004). DOI: 10.1007/978-3-540-30201-8_59 y Proceedings 10th International Conference on Practice of Constraint Programming (CP 2004), 27 de septiembre – 1 de octubre de 2004, Toronto (Canadá). Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/221632962_Solving_the_Crane_Scheduling_Problem_Using_Intelligent_Search_Schemes
984. Lim, A.; Rodrigues, B. y Zhou, X. (2004c). *Approximation Schemes for the Crane Scheduling Problem*. Proceedings of Algorithm Theory - SWAT 2004, 9th Scandinavian Workshop on Algorithm Theory, 8-10 de julio de 2004, Humlebaek (Dinamarca). DOI: 10.1007/978-3-540-27810-8_28. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/221209348_Approximation_Schemes_for_the_Crane_Scheduling_Problem.
985. Lin, W. (2000). *On dynamic crane deployment in container terminals*. Master of philosophy in industrial engineering and engineering management, University of Science and Technology. (2000) y abstract posteriormente publicado en IIE Transactions vol. 35(2): 38-39 Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/35742960_On_dynamic_crane_deployment_in_container_terminals
986. Lin, X.; Chajakis, E.D. y Christodoulos, A.F. (2003). *Scheduling of Tanker Lightering via a Novel Continuous-Time Optimization Framework*. Industrial & Engineering Chemistry Research 42(20): 4441-4451. DOI: 10.1021/ie0205400. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/231370668_Scheduling_of_Tanker_Lightering_via_a_Novel_Continuous-Time_Optimization_Framework

987. Lindley, D.V. (1952). *The theory of queues with a single server*. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, vol. 48(2): 277-289. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] DOI: [10.1017/S0305004100027638](https://doi.org/10.1017/S0305004100027638)
988. Linn, R.J. y C.Q. Zhang. (2003). *A heuristic for dynamic yard crane deployment in a container terminal*. IIE Transactions vol. 35(2):161-174. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/292103731_A_heuristic_for_dynamic_yard_crane_deployment_in_a_container_terminal
989. Liu, C. (2000). *Smalltalk, Objects, and Design*. Publicado por iUniverse (April 27, 2000). 312 páginas ISBN-10: 1583484906 / ISBN-13: 978-1583484906.
990. Liu, C.-M. y Sherali, H.D. (2000). *A coal shipping and blending problem for an electric utility company*. Omega, vol. 28(4): 433–444. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048399000675>
991. Liu, C.I.; Jula, H. y Ioannou, P. (2002). *Design, simulation, and evaluation of automated container terminals*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems vol. 3(1): 12–26. Disponible en [fecha de acceso 28.11.2016] <http://www-bcf.usc.edu/~ioannou/2003update/d68.pdf>
992. Liu, C. I.; Jula, H.; VReino Unidoadinovic, K. y Ioannou, P. (2004). *Automated guided vehicle system for two container yard layouts*. Transportation Research Part C 12(5): 349–368. Disponible en [fecha de acceso 28.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2004.07.014>
993. Liu, H.-B. y Zhang, Z.P. (2006). *Enlightenment concerning design of modern specialized automobile Ro/Ro wharf*. Port & Motorway Engineering, vol. 10(1): 91–93. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://www.airitilibrary.com/Publication/alDetailedMesh?docid=10024972-200610-2006-10-91-93-a>.
994. Liu, J.; Wan, Y.-W. y Wang, L. (2006). *Quay Crane Scheduling at Container Terminals To Minimize the Maximum Relative Tardiness of Vessel Departures*. Naval Research Logistics vol. 53(1): 60–74 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 28.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/230269830_Quay_crane_scheduling_at_container_terminals_to_minimize_the_maximum_relative_tardiness_of_vessel_departures
995. Liu, M. y Dong, M. (2008). *The Simulation Technology of Port Container Logistics System on Flexsim*. Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics

- and Transportation Professionals (ICCLTP). 8-10 de octubre de 2008, Chengdu (China), pp: 2547–2552. doi:10.1061/40996(330)376. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 28.11.2016] [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40996\(330\)376](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40996(330)376)
996. Liu, X.; B. Zhao; B. Li y N. Wang (2010). *A System Dynamics Model of the Interaction between Port and City Based on the Green Concept*. Proceedings of the CLEM 2010: Logistics For Sustained Economic Development: Infrastructure, Information, Integration y Volume I - Logistics Policy and Strategy, American Society of Civil Engineers (ASCE), pp: 681-688. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41139%28387%2995>
997. Liu, Y. y Takakuwa, S. (2011). *Modelling the material handling in a container terminal using electronic real-time tracking data*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Editado por Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, y M. Fu, pp: 1596-1604 Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc11papers/142.pdf>
998. Lodewijks, G.; Schott, D. y Ottjes, J.A. (2009). *Modern dry bulk terminal design*. Port Technology International 43(1): 87-94. Presentado en Proceedings of Beltcon 14 Conference, South Africa, Disponible bajo petición en [fecha de acceso 30.11.2016] [https://www.researchgate.net/publication/297828850_Modern_dry_bulk_terminal_desi](https://www.researchgate.net/publication/297828850_Modern_dry_bulk_terminal_design-)
[gn-](https://www.researchgate.net/publication/297828850_Modern_dry_bulk_terminal_design-)
999. Loh, S.N. (1996). *The Quadratic assignment problem and its generalization to the berth allocation problem*. Honours Years Project Report, DISCS, NUS
1000. Long S.; Nachtmann, H.; Oztanriseven, F. y Pérez-Lespier, L. (2014). *Feasibility Analysis of System Dynamics for Inland Maritime Logistic*. Internal Report NUTC R356. (febrero 2014). Center for Transportation Infrastructure and Safety. National University Transportation Center at Missouri University of Science and Technology. Missouri (Estados Unidos) Disponible en [fecha de acceso 29/11/2016] http://ntl.bts.gov/lib/52000/52700/52726/R356_Final_Report.pdf
1001. Long, Y.; Zhang, G. (2010). *General design of professional automobile Ro-Ro terminals*. Port & Waterway Engineering vol. 2010(6):64-67. Disponible en [fecha de acceso 20.05.2017] [http://caod.oriprobe.com/articles/24145508/General_design_of_professional_automobil](http://caod.oriprobe.com/articles/24145508/General_design_of_professional_automobile_Ro_Ro_terminals.htm)
[e_Ro_Ro_terminals.htm](http://caod.oriprobe.com/articles/24145508/General_design_of_professional_automobile_Ro_Ro_terminals.htm)
1002. López I.; Camarero, A.; Negro, V. y González N. (2011). *Terminales multicliente vs terminales dedicadas – Estudio del caso del puerto de Valencia*. Conferencia Anual de la

- Asociación Internacional de Economistas Marítimos IAME 2011 Latino América. 25 a 28 de Octubre de 2011, Santiago de Chile (Chile). Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] http://oa.upm.es/16328/1/IAME_2011-UPM.pdf
1003. López, A. (2002). *Simulación del movimiento de personas a bordo. Aplicación a situaciones de emergencia*. Jornadas Universidad Politécnica de Madrid – Fuerzas Armadas, Madrid (España).
1004. López, A. y Pérez F. (2002). *Models and tools for the ship evacuation simulation*. Proceedings of the 3rd International Congress on Maritime Technological Innovations and Research. Bilbao, España.
1005. López, A. y Pérez F. (2003a). *Designer and marter aids to improve the evacuation of passanger ships*. Proceedings of the World Maritime Thecnical Conference. San Francisco, Estados Unidos. 17-20 Octubre 2003. Editado por SNAME (The International Community for Maritime and Ocean Professionals). <http://www.sname.org/pubs/viewtechnicalpaper?DocumentKey=6a530c24-996a-4134-8cdf-4e0d966ade66>
1006. López, A. y Pérez F. (2003b). *Ship evacuation optimization. Tools for master and designers aid*. Proceedings of the 2nd International Conference in Pedrestrian and Evacuation Dynamics (PED'03), Londres (Reino Unido). 20-22 de Agosto de 2003.
1007. López, A.; Pérez, F.; Donoso, R. y Torres, R. (2004) *Ship pedrestian flow simulation. The Sifbup-S application*. Capítulo 2 en Automatation for the Maritime Industries (editado por Joaquín Aranda Galleo, Manuel Armada y Jesús Manuel de la Cruz). Instituto de Automática Industrial. Madrid (España). pp: 23-41. ISBN 8460933156, 9788460933151. 273 páginas. Disponible en [fecha de últiumo acceso el 29.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/263580947_Automation_for_the_Maritime_Industries
1008. López, A. (2005). Simulación del flujo de personas y vehículos en buques de pasaje: Proyecto SIFBUP. Ingeniería Naval, vol. 74 (2005): 93–104.
1009. López, A.; Pérez, F., Donoso, R., y Torres, R. (2005). *Simulation of Passengers Movement on Ship Emergencies. Tools for IMO Regulations Fulfiment*. Journal of Maritime Research, vol. II(1): 1005-125. Disponible en [fecha de últiumo acceso el 29.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/28100108_Simulation_of_passengers_movemnt_on_ship_emergencies_tools_for_IMO_regulations_fulfilment

-
1010. Lozano-Pérez, T. y Wesley, M.A. (1979). *An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles*. Communications of the Association for Computing Machinery (ACM), vol. 22(10): 560-570. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] [doi>10.1145/359156.359164](https://doi.org/10.1145/359156.359164)
1011. Lu, J.; Fu, M. y Sha, J. (2005). Research of import iron ore logistics system based on the minimum cost theory. Proceedings of International Conference on Services Systems and Services Management (ICSSSM'05), vol. 1(1): 391–396. 13-15 de junio de 2005, Chongqing (China). Disponible en [fecha de acceso 30.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/4169199_Research_of_import_iron_ore_logistics_system_based_on_the_minimum_cost_theory
1012. Lua (2017). *Lua programming lenguaje*. LabLua. Departamento de Informática, PUC-Rio de Janeiro (Brasil). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.lua.org>
1013. Luan, W.; Chen, H. y Wang, Y. (2010). *Simulating Mechanism of Interaction Between Ports and Cities Based on System Dynamics: A Case of Dalian, China*. Chinese Geography Society 2010, vol. 20(5): 398-405. DOI: 10.1007/s11769-010-0413-5. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://egeoscientific.net/fileup/PDF/20100915.pdf>
1014. Luca, S.; Cantarella, G.E. y Cartenì, A. (2009). *A macroscopic model of a container terminal based on diachronic networks*. Capítulo en “*Schedule-Based Dynamic Transit Modeling: Theory and Applications*”, Kluwer Academic Publishers, 2009, pp: 285–310. Editado por N.H.M. Wilson y A. Nuzzolo.
1015. Luke, S.; Balan, G.; Panait, L.; Cioffi-Revilla, C.; Paus, S. y. (2003). *MASON: A Java Multi-Agent Simulation Library*. Proceedings of the Agent 2003 Conference. 15 páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/publications/Agent2003.pdf>
1016. Luke, S.; Cioffi-Revilla, C.; Panait, L. y Sullivan, K. (2004). *MASON: A New Multi-Agent Simulation Toolkit*. Proceedings of the 2004 SwarmFest Workshop. 8 páginas Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/publications/SwarmFest04.pdf>
1017. Luke, S.; Cioffi-Revilla, C.; Panait, L.; Sullivan, K. y Balan, G. (2005). *MASON: A multiagent simulation environment*. Simulation, vol. 81(7): 517–527. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://cs.gmu.edu/~sean/papers/simulation.pdf>

1018. Luke, D.A. y Stamatakis, K.A. (2012). *Systems science methods in public health: Dynamics, networks, and agents*. Annual Review of Public Health, vol. 33(04): 357–376. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-publhealth-031210-101222?journalCode=publhealth>
1019. Luo, J.; Wu, Y.; Halldorsson, A. y Song, X. (2011). *Storage and stacking logistics problems in container terminals*. OR Insight, vol. 24(4): 256–275. Disponible en [fecha de acceso 07.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/220438579_Storage_and_stacking_logistics_problems_in_container_terminals
1020. Lynch, C.; Padilla, J.; Diallo, S.; Sokolowski, J. y Banks C. (2014). *A multi-paradigm modelling framework for modeling and simulation problem situations* Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Editado por A. Tolk, S.Y. Diallo, I.O. Ryzhov, L. Yilmaz, S. Buckley, y J. A. Miller. Páginas 1688 – 1698. Disponible en [último acceso en 15/11/2017] <http://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/149.pdf>
1021. Ma, H.L.; Chan, F.T.S.; Chung, S.H. y Wong, C. S. (2012). *Berth Allocation Planning for Improving Container Terminal Performance*. Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 3 de julio de 2012, Estambul (Turquía), pp:502-508. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://www.iiom.org/ieom2012/pdfs/121.pdf>
1022. Macal, C. (2010). *To agent-based simulation from system dynamics*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (Editado por B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, y E. Yücesan); pp: 371 - 382. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc10papers/034.pdf>
1023. Macal, C.M. y North M.J: (2013). *Introductory tutorial: Agent-Based Modeling and Simulation*. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference (Editado por R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, y M. E. Kuhl), pp: 362-376. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.03.2017] <http://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/031.pdf>
1024. Macal, C.M. (2016). *Everything you need to know about agent-based modelling and simulation*. Journal of Simulation, vol. 10(1): 144- 156. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/302923196_Everything_you_need_to_know_about_agent-based_modelling_and_simulation

-
1025. Mack, D.; A. Bortfeldt y H. Gehring. (2004). *A Parallel Hybrid Local Search Algorithm for the Container Loading Problem*. International Transactions in Operational Research, vol. 11(5): 511–533. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-3995.2004.00474.x/abstract>
1026. Madachy, R.; Haas, B.; Bradbury, H.; Newell, J.; Rahimi, M.; Vos, R. y Wolch, J. (2008). *Achieving sustainable development in southern California: Collaborative Learning through System Dynamics Modelling*. Proceedings of the 18th Annual Symposium of International Council of Systems Engineering (INCOSE'08). 15-19 de Junio de 2008, Utrecht (Holanda). Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] http://urbansustainability.snre.umich.edu/wp-content/uploads/2014/08/2008_Madachy-et-al_Achieving-sustainable-development-in-southern-California.pdf.
1027. Madansky, A. (1960). *Inequalities for stochastic linear programming problems*. Management Science, vol. 6(1) : 197-204. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] <http://www.im-uff.mat.br/puc-rio/disciplinas/2006.1/soe/arquivos/mandansky-management-science-1960.pdf>
1028. Maddala, G.S. y Lahiri. K. (1992). *Introduction to econometrics*. Revista de Economía Aplicada, vol. 3(1): 223-226. Editado por Macmillan (New York). Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://www.revecap.com/revista/numeros/03/pdf/raymond.pdf>
1029. Madsen, O.L.; Møller-Pedersen, B., Nygaard, K. (1983). *From SIMULA 67 to BETA*. Proceedings of the 11th SIMULA 67 User's Conference. Paris 1983. Norwegian Computing Center, 1983.
1030. Madsen, O.L.; Møller-Pedersen, B. y Nygaard N. (1993). *Object-Oriented Programming in the BETA Programming Language*. Addison-Wesley, Junio 1993, ISBN 0-201-62430-3, 337 páginas. Reimpresión por Mjølner Informatics en el año 2000. Disponible en internet en https://www.researchgate.net/publication/220695504_Object-Oriented_Programming_in_the_BETA_Programming_Language
1031. Madsen, O.L. (2016). *BETA lenguaje home page*. Computer Science Department, Aarhus University. REcurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017]. <http://daimi.au.dk/~beta/>
1032. Maglio, P.P.; Sepulveda, M.-J. y Mabry, P.L. (2014). *Mainstreaming modeling and simulation to accelerate public health innovation*. American Journal of Public Health, vol. 104(7): 1181–1186. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://ajph.aphapublications.org/doi/10.2105/AJPH.2014.301873>

-
1033. Mai, Y.J.Y. (2007). *Analysis on the development of Ro/Ro system for domestic sea port*. Research on Waterborne Transportation, vol. 1(1): 6–8. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] http://caod.oriprobe.com/articles/11905536/Analysis_on_the_Development_of_Ro_Ro_System_for_Domestic_Sea_Port.htm
1034. Maidstone, R.: (2012) *Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison*. Lancaster University. Lancaster (Reino Unido). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016] <http://www.lancs.ac.Reino Unido/~maidston/Short%20Project1.pdf>
1035. Maione, G. y Ottomanelli, M. (2005). *A petri net model for simulation of container terminals operations*. Advanced OR and AI methods in transportation, Poznan University of Technology, pp: 373–378. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID58.pdf>
1036. Maisel, H. y Gnugoli, G. (1972). *Simulation of discrete stochastic systems*. Palo Alto: Science Research Associates. (1ª edición Junio 1972). 465 páginas. ISBN-10: 0574161333 / ISBN-13: 978-0574161338
1037. Majid, M.A.; Aickelin, U. y Siebers, P.-O. (2009). *Comparing Simulation Output Accuracy of Discrete Event and Agent Based Models: A Quantitative Approach*. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, 2009, pp: 177-184. Disponible en [fecha de acceso 18.10.2016] <http://arxiv.org/pdf/1001.2170.pdf>.
1038. Mak, K.L. y Sun, D. (2009). *A new hybrid genetic algorithm and Tabu Search Method for yard cranes scheduling with inter-crane interference*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, vol. 1(1): 526-531. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp526-531.pdf
1039. Makita, Y.; Hagiwara, M. y Nakagawa, M. (1994). *A simple path planning system using fuzzy rules and a potential field*. Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Fuzzy Systems & IEEE World Congress on Computational Intelligence, 26-29 de Junio de 1994, Orlando (Florida, Estados Unidos), vol. 2(1): 994-999. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <http://10.0.4.85/FUZZY.1994.343871>
1040. Maksimavicius, R. (2004). *Some elements of the Ro-Ro terminals*. Transport-2004, vol. 19(2): 75–81. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/16484142.2004.9637957>

-
1041. Malleson, N. (2007). *Human Behaviour in an Agent-Based Model of Burglary*. Paper presentado en GeoComputation 2007, 3-5 Septiembre de 2007, NUI Maynooth (Irlanda) Disponible en [fecha de acceso 20.03.2017]
1042. Malleson, N. (2008). *Improving Burglary-Reduction Initiatives Through A Realistic Agent-Based simulation*. Presentación en British Society of Criminology Conference, 9-11 de Junio de 2008. Universidad de Huddersfield (Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso 20.03.2017] http://www.geog.leeds.ac.uk/fileadmin/documents/peoplepages/n.malleson/bsc_talk08.pdf
1043. Malleson, N. (2009). *Using Simulation to Predict Prospective Burglary Rates in Leeds and Vancouver*. Proceedings of the 7th National Crime Mapping Conference, Manchester (Reino Unido), 7-8 de Mayo de 2009. Manchester (Reino Unido).
1044. Malleson, N. (2010). *Agent-Based Modelling of Burglary*. PhD Thesis, School of Geography, University of Leeds (Reino Unido). 92 páginas. Disponible en [fecha de acceso 20.03.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.99.8246&rep=rep1&type=pdf>
1045. Malleson, N.; Heppenstall, A. y See, L. (2010). *Crime reduction through simulation: An agent-based model of burglary*. Computers, Environment and Urban Systems, volumen 34(3): 236–250. Disponible en [fecha de acceso 20.03.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971509000787>
1046. Malmberg, C.J. (2000). *Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol. 38(18): 4599-4610. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540050205532>
1047. Malmberg, C.J. (2001a). *Rule of thumb heuristics for configuring storage racks in automated storage and retrieval systems design*. International Journal of Production Research, vol. 39(3): 511-527. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/0020754001004368>
1048. Malmberg, C.J. (2001b). *Estimating cycle type distributions in multi-shuttle automated storage and retrieval systems*. International Journal of Industrial Engineering, vol. 8(2): 150-158. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/286049716_Estimating_cycle_type_distributions_in_multi-shuttle_automated_storage_and_retrieval_systems

-
1049. Malmborg, C.J. (2002). *Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol. 40(8): 1807-1822. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540110118668>
1050. Malmborg, C.J. (2003). *Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol. 41(5): 1057-1069. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/0020754021000033887>
1051. Mangan, J.; Lalwani, C. y Gardner, B. (2002). *Modelling port/ferry choice in Ro-Ro freight transportation*. International Journal of Transport Management, vol. 1(1): 15–28. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] DOI: [10.1016/S1471-4051\(01\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S1471-4051(01)00003-9)
1052. Manzini, R., Gamberi, M. y Regattieri, A. (2006). *Design and control of an AS/RS*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 28(7-8): 766–774. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/225862856_Design_and_control_of_an_ASRS
1053. Manzini, R. (2012). *Warehousing in the Global Supply Chain, chapter 8: Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies*. Springer-Verlag, London, 2012. ISBN 978-1-4471-2273-9. (486 páginas). DOI: 10.1007/978-1-4471-2274-6. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://www.springer.com/us/book/9781447122739>
1054. Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S. y Tappia, E: (2011). *Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes*. International Journal of Production Research, vol. 50(24): 7134-7148. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.639815>
1055. Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S. y Tappia, E: (2013). *Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems*. International Journal of Production Research, vol.51(14): 4365-4387. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.778430>
1056. Maria, A. (1997). *Introduction to modeling and simulation*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers y B. L. Nelson. pp: 7-13. Disponible en (fecha de acceso 29.10.2016): https://www.inf.utfsm.cl/~hallende/download/Simul-2-2002/Introduction_to_Modeling_and_Simulation.pdf

1057. Marin, F.; Garcia, I.; Ortiz, A. y Arreche, L.M. (2004). *Gantry crane operations to transfer containers between trains: A simulation study of a Spanish terminal*, Transportation Planning and Technology, vol. 27(4): 261-284. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) https://www.researchgate.net/publication/245313568_Gantry_crane_operations_to_transfer_containers_between_trains_A_simulation_study_of_a_Spanish_terminal
1058. Markowitz, H. M.; Hausner, B. y Karr H. W. (1962). *SIMSCRIPT: A simulation programming language*. Memorandum RM-310-PR (Noviembre 1962) preparado para United States Air Force Project RAND. The Rand Corporation. Santa Mónica – California. Editado también en 1963 por Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. Memorandum original disponible en [fecha de acceso 13.10.2016] https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2009/RM3310.pdf
1059. Markowitz, H. M. (1979). *SIMSCRIPT: Past, present, and some thoughts about the future*. Academic Press. Capítulo en Current issues in computer simulation (Editado por N. R. Adam y A. Dogramaci) New York (Estados Unidos). Páginas: 27-60.
1060. Markowitz, H. M. (1990). *Harry M. Markowitz - Biographical*. Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. disponible en [fecha de último acceso el 25/01/2017]. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1990/markowitz-bio.html
1061. Marón, A.; Valle, J.; Riola, J.M.; Quesada, T. y Henríquez, F. (2002). *Evacuación de buques de pasaje: Necesidades e investigación*. Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Ministerio de Defensa. XLI Sesiones Técnicas de Ingeniería Civil. Gijón (España). Junio de 2002. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] <http://www.cehipar.es/files/users/publicaciones/164.pdf>
1062. Marti, J. (1999). *Object-oriented Modeling And Simulation With Modsim III*. © CACI Advanced Simulation Lab. San Diego (Estados Unidos).
1063. Martin, F. (1968). *Computer modeling and simulation*. New York: John Wiley & Sons; (Enero 1968). 344 páginas. ISBN-10: 0471573523 / ISBN-13: 978-0471573524
1064. Martín, A.M (2012). *The Capacity in Container Port Terminals*; UNCTAD Ad Hoc Expert Meeting on Assessing Port Performance, 12 de Diciembre de 2012. Ginebra (Suiza). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] http://unctad.org/meetings/en/Presentation/dtl_ttl_2012d10_Soberon.pdf

-
1065. Martín-Adino, R. (2006). *El efecto látigo (Bullwhip) en las cadenas de suministro y la dependencia de los agentes que las integran*. Tesis Doctoral realizada en el Departamento de Organización Industrial de la Universidad Pontificia de Comillas de Madrid – ETS de Ingeniería ICAI. Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) http://www.sp.upcomillas.es/sites/DOI/Documentos%20Pblicos/www_Doi/tesis/tesis_RamonMartinAndino.pdf.
1066. Martínez, L.J. y Lambert, J.H. (2010). *Prioritising sources of risk at liquefied natural gas storage terminals in Mexico*. International Journal of Business Continuity Risk Management, vol. 1(4): 363–383. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: [10.1504/IJBCRM.2010.038624](https://doi.org/10.1504/IJBCRM.2010.038624)
1067. Martinssen, D.; Steenken, D.; Wölfer, F.; Reiners, T. y Vos, S. (2001). *Einsatz bioanaloger Verfahren bei der Optimierung des wasserseitigen Containerumschlags*. Sebastian H, Grünert T (eds) Logistik management - supply chain management und e-business, pp: 377-388. Teubner, Stuttgart. DOI: 10.1007/978-3-322-87181-7_31. Disponible bajo petición [fecha de acceso 15.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/242070869_Einsatz_Bioanaloger_Verfahren_bei_der_Optimierung_des_Wasserseitigen_Containerumschlags
1068. Masaaki, I. (1986). *Kaizen: The Key to Japanese Competitive Success*. McGraw-Hill Education (New York, Noviembre 1986). 260 Páginas. ISBN-10: 007554332X / ISBN-13: 978-0075543329.
1069. MASON (2016). *MASON*. Department of Computer Science. George Mason University. Fairfax, Virginia (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 15.02.2017] <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>
1070. Mastrolilli, M.; Fornara, N.; Gambardella, L. M; Rizzoli, A. E. y Zaffalon, M, (1998). *Simulation for policy evaluation, planning and decision support in an intermodal container terminal*. Proceedings of the International Workshop 'Modeling and Simulation within a Maritime Environment', Editado por Y. Merkuryev, A. Bruzzone y L. Novitsky Society for Computer Simulation International, 6-8 de septiembre de 1998, Riga (Letonia), pp: 33-38. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2608020_Simulation_For_Policy_Evaluation_Planning_And_Decision_Support_In_An_Intermodal_Container_Terminal.
1071. Matear, S. y Gray, R. (1993). *Factors Influencing Freight Service Choice for Shippers and Freight Suppliers*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol. 23(2): 25-35. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] DOI: [10.1108/0960003931003819](https://doi.org/10.1108/0960003931003819)

-
1072. Matsushita, S. (1992). *A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement with Queuing*, Journal for Architecture, Planning, and Environmental Engineering, nº 432 (1992): 79-92.
1073. Mattfeld, D.C. y Kopfer, H. (2003). *Terminal operations management in vehicle transshipment*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 37(5): 435–452. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00035-6)
1074. Mattfeld, D.C. (2006). *The management of Transshipments Terminals: Decision Support for Terminal Operations in Finished Vehicle Supply Chains*. Operations Research / Computer Science Interfaces Series. Computer Science Interfaces Series, Vol. 34. 174 Páginas. ISBN 978-0-387-30853-1
1075. Mauri, G. R.; Oliveira, A. C. M. y Lorena, L. A. N. (2008). *A hybrid column generation approach for the berth allocation problem*. Proceedings of the 8th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimisation – EvoCOP 2008. Lecture Notes in Computer Science, 4972, pp: 110-122. (Editado por J. van Hemert y C.Cotta). Berlin: Springe. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] http://www.lac.inpe.br/~lorena/mauri/bap_ptalp_evocop.pdf
1076. Mavrakakis, D. y Kontinakis, N. (2008). *A queueing model of maritime traffic in Bosporus Straits*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16(1): 315–328. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.11.013>
1077. McGinnis, M.A. (1979). *Shipper Attitudes Toward Freight Transportation Choice: A Factor Analytic Study*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol. 10(1): 25-34. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] DOI: [10.1108/eb014464](https://doi.org/10.1108/eb014464)
1078. Mckay, M. D. y Hartley, H. O. (1974). *Computerized Scheduling of Seagoing Tankers*. Naval Research Logistics Quarterly, 21(1): 255-264. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] DOI: [10.1002/nav.3800210205](https://doi.org/10.1002/nav.3800210205)
1079. McMillan, C.; Gonzales, R. y Schriber, T.J. (1973). *Systems analysis: A computer approach to decision models*. Homewood IL: Pubicado por R.D. Irwin (Irwin series in quantitative analysis for business). 610 páginas. ISBN-10:, 0256014396 / ISBN 13: 9780256014396

-
1080. Meadows, D.H.; Meadows, G.; Randers, J. y Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth*. New York Universe Books. 207 páginas. ISBN-10: 0451057678. ISBN-13: 978-0451057679
1081. Meadows, D.H. y Randers, J. (1992). *Beyond the Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future*. Hardcover – May, 1992 ISBN-13: 978-0930031558 ISBN-10: 0930031555
1082. Meersmans, P.J.M. y Dekker, R. (2001). *Operations research supports container handling*. Econometric Institute Report 234, Erasmus University Rotterdam. 22 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] repub.eur.nl/pub/1689/feweco20011102151222.pdf.
1083. Meersmans P.J.M. y Wagelmans A.P.M. (2001a). *Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals*. Technical Report EI 2001-19, Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute, (2001). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://ssrn.com/abstract=370889>
1084. Meersmans P.J.M. y Wagelmans A.P.M. (2001b). *Dynamic scheduling of handling equipment at automated container terminals*. Technical Report EI 2001-33, Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute, ERIM Report Series Reference No. ERS-2001-69-LIS (2001). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]; <https://ssrn.com/abstract=370931>
1085. Meersmans, P.J.M. (2002). *Optimization of Container Handling Systems*. Ph.D. Thesis, Tinbergen Institute 271, Erasmus, University Rotterdam (2002). Disponible en [fecha de acceso 15.10.2016] <https://repub.eur.nl/pub/1855/fewdis20020313164327.pdf>
1086. Meier, R.; Newell, W. T. y Pazer, H. L.(1969). *Simulation in business and economics*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 369 páginas. ISBN-10: 0138103747 / ISBN-13: 978-0138103743.
1087. Meisel, F. y Bierwirth, C. (2006). *Integration of berth allocation and crane assignment to improve there source utilization at a seaport container terminal*. Operations Research Proceedings 2005. Springer, Berlin, pp: 105–110. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/221563377_Integration_of_Berth_Allocation_and_Crane_Assignment_to_Improve_the_Resource_Utilization_at_a_Seaport_Container_Terminal

-
1088. Meisel, F. y Bierwirth, C. (2009). *Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem*. Transportation Research Part E, vol. 45(1): 196–209. DOI: 10.1016/j.tre.2008.03.001. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/227427257_Heuristics_for_the_integration_of_crane_productivity_in_the_berth_allocation_problem.
1089. Meisel, F. y Bierwirth, C. (2011). *A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms*. Computers & Operations Research, vol. 38(3): 683–693. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810001632>
1090. Meller, R.D. y Gau, K.-Y. (1996). *The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 15(5): 351–366. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0278612596841987>
1091. Mendez, C.A.; Grossmann, I.E.; Harjunkski, I. y Kaboré, P. (2004). *Optimizacion techniques for blending and scheduling of oil-refinery operations*. Recurso en línea. 41 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://egon.cheme.cmu.edu/Papers/CarlosBlendingABB%20Paper-pub.pdf>
1092. Mendez, C.A.; Grossmann, I.E.; Harjunkski, I. y Kaboré, P. (2006). *A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations*. Computers & Chemical Engineering vol. 30(4): 614–634. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135405002966>
1093. Menges, F., Mishra, B. y Narzisi, G. (2008). *Modeling and Simulation of E-Mail Social Networks: A New Stochastic Agent-Based Approach*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, editado por S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson, y J. W. Fowler, pp: 2792–2800. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <https://cs.nyu.edu/mishra/PUBLICATIONS/08.wsc08Expert.pdfand-simulation-of-email-social-networks.pdf>
1094. Mennis, E.; Platis, A.; Lagoudis, I.N. y Nikitakos, N. (2008). *Improving port container terminal efficiency with the use of Markov theory*. Maritime, Economics & Logistics, vol. 10(3): 243–257. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [doi:10.1057/mel.2008.3](https://doi.org/10.1057/mel.2008.3)
1095. Merkuryev, Y.; Tolujew, J.; Blümel, E.; Novitsky, L.; Ginters, E.; Viktorova, E.; Merkuryeva, G. y Pronins, J. (1998). *A modelling and simulation methodology for managing the Riga harbor container terminal*. Simulation, Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, vol. 71(2): 84–95, 1998. DOI:

- 10.1177/003754979807100203. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/220165111_A_Modelling_and_Simulation_Methodology_for_Managing_the_Riga_Harbour_Container_Terminal
1096. Merkurjeva, G.; Merkurjev, Y. y Tolujev J. (2000). *Computer simulation and metamodelling of logistics processes at a container terminal*. Studies in Informatics and Control. 9(1): 1-10. Editado por ICI Publishing House. ISSN 1220-1766 (Print) y ISSN 1841-429X (online).
1097. Merrick, J.R.W.; van Dorp, J.R.; Blackford, J.P.; Shaw, G.L.; Harrauld, J. y Mazzuchi, T.A. (2003). *A traffic density analysis of proposed ferry service expansion in San Francisco Bay using a maritime simulation model*. Reliability Engineering & System Safety, vol. 81(2): 119-132. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017]
<https://www2.gwu.edu/~icdrm/publications/RESS2003.pdf>
1098. Merrick, J.R.W.; van Dorp, J.R.; Harrauld, J.; Mazzuchi, T.; Spahn, J.E. y Grabowski, M. (2000). *A systems approach to managing oil transportation risk in Prince William Sound*. System Engineering, vol. 3(3): 128-142. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: [10.1002/1520-6858\(200033\)3:33.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1520-6858(200033)3:33.0.CO;2-R)
1099. Mes, M.; Iacob, M.-E. y van Hillegersberg, J. (2014). *A distributed barge planning game*. Proceedings of the International Simulations and Gaming Association (ISAGA 2013), 24-28 de Junio de 2013, Estocolmo (Suecia) y recogido en Frontiers in Gaming Simulation, vol. 8264: 214-221 (Editado por S.A. Meijer y R. Smeds). Springer, Heidelberg. Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] DOI: [10.1007/978-3-319-04954-0_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04954-0_25)
1100. Mes, M. y Douma A. (2016). *Agent-Based Support for Container Terminals to Make Appointments with Barges*. Proceedings of the International Conference on Computational Logistics (Computational Logistics - ICCL 2016). Lecture Notes in Computer Science, vol. 9855. Springer, Cham pp: 80-95 (Editado por A. Paías, M. Ruthmair M. y S. Voß). Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-44896-1_6
1101. Mettam, J.D. (1967). *Forecasting delays to ships in ports*. The Dock and Harbor Authority. Londres (Reino Unido), vol. XLVII(558): 380-382
1102. Meyer, B. (1991). *Eiffel: The Language*. Prentice Hall, segunda edición, 1992 (Primera edición: 1991). 650 páginas. ISBN-10: 0132479257 y ISBN-13: 978-0132479257.

-
1103. Meyer, B. (1998). *Construcción de Software Orientado a Objetos. (Traducido por Luis Joyanes Aguilar)* Prentice Hall. 1198 páginas. ISBN-10: 9788483220405
1104. Michalewicz, Z. (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer -Verlag, Berlin Heidelberg. Consultada 3ª Edición revisada y extendida (1998). (2ª Edición 1996). 387 Páginas. ISBN-10: 3540606769 / ISBN-13: 978-3540606765.
1105. Microcity (2017). *MicroCity - A Spatial Analysis and Simulation Framework*. DMU, Dalian Maritime University; Hayashi & Kato Lab., Nagoya University & CMS, National University of Singapore, Singapore (Singapore). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <http://microcity.github.io/index.html>
1106. Microport (2017). *Micropor Application*. DMU, Dalian Maritime University; Hayashi & Kato Lab., Nagoya University & CMS, National University of Singapore, Singapore (Singapore). Recurso en línea.. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <http://microcity.github.io/features.htm>
1107. Miller, A. J. (1971). *Queuing at single-berth shipping terminal*. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, vol. 97(1): 43- 56.
1108. Minar, N.; Burkhart, R.; Langton, C. y Askenazi, M. (1996). *The swarm simulation system, a toolkit for building multi-agent simulations*. Working Paper 96-06-042, Santa Fe Institute, Santa Fe, Nuevo Méjico (Estados Unidos), Disponible en [fecha de acceso 07.10.2016] <http://samoa.santafe.edu/media/workingpapers/96-06-042.pdf>
1109. Mingming, F. (2011). *Port and Economy Relationship Analysis by System Dynamics*. Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Engineering (ICTE 2011). American Society of Civil Engineers (ASCE), 23-25 de Julio de 201, Chengdu (China), pp: 162-167. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/41184\(419\)28](http://dx.doi.org/10.1061/41184(419)28)
1110. Minitorn (1997). *Activity Diagram Cycle*. Recurso en línea de Tallin University (Tallin, Estonia). Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] <http://minitorn.tlu.ee/~jaagup/Reino Unido/ds/chp3/CHAP3P~1.HTM>
1111. Minuteman Software (2010) [recurso en línea]. *GPSS World* ©. Holly Springs, North Carolina. Carolina del Norte (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <http://www.minutemansoftware.com/>.

-
1112. Mize, J. H., y Cox J. (1968). *Essentials of simulation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs. (Prentice-Hall international series in industrial engineering and management science). New York. 234 páginas ISBN-10: 0132889021 / ISBN-13: 978-0132889025.
1113. Moccia, L.; Cordeau, J. F.; Gaudioso, M. y Laporte, G. (2006). *A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal*. Naval Research Logistic, vol. 53(1): 45–59. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://neumann.hec.ca/chairedistributique/common/cs.pdf>
1114. Mock, K. J., y Testa, J.W. (2007). *An Agent-Based Model of Predator-Prey Relationships between Transient Killer Whales and Other Marine Mammals*. University de Alaska Anchorage, Anchorage, Alaska (Estados Unidos), 31 de Mayo de 2007. 38 páginas. Disponible en [fecha de acceso 28.03.2017] www.math.uaa.alaska.edu/~orca/
1115. Mohring, H. (1972). *Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation*. American Economic Review, vol. 62(4): 591-604. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/54245/1/1971-05.pdf>
1116. Moller, T., Parker, H.D. y Nichols, J.A. (1987). *Comparative costs of oil spill cleanup techniques*. Proceedings of the 1987 International Oil Spill Conference: Prevention, Behavior, Control, Cleanup (IOSC'87); 6-9 de Abril de 1987; Baltimore, Maryland (Estados Unidos), vol. 1(1): 123–127. <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1987-1-123> Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://ioscproceedings.org/doi/pdf/10.7901/2169-3358-1987-1-123>
1117. Monaco, M. F. y Sammarra, M. (2007). *The berth allocation problem: a strong formulation solved by a Lagrangean approach*. Transportation Science, vol. 41(2): 265-280. Disponible bajo petición en [fecha de acceso e 25.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/220413281_The_Berth_Allocation_Problem_A_Strong_Formulation_Solved_by_a_Lagrangean_Approach.
1118. Mondragon, A.E.C.; Lalwani, S.C.; Mondragon E.S.C.; Mondragon C.E.C. y Pawar, K.S. (2012). *Intelligent transport systems in multimodal logistics: a case of role and contribution through wireless vehicular networks in a sea port location*. International Journal of Production Economics, vol. 137(1): 165–175. Disponible en [fecha de acceso 26.11.2016] http://ac.els-cdn.com/S0925527311004683/1-s2.0-S0925527311004683-main.pdf?_tid=ab963e80-abad-11e6-a3ba-00000aabb0f02&acdnat=1479294975_fb5bf1fdbf737b6d37d282443a8352d8
1119. Monostoria, L.; Váncza, J. y Kumara, S.R.T. (2006). *Agent-based systems for manufacturing*. CIRP Annals—Manufacturing Technology, vol. 55(2): 697–720.

- Disponible en [fecha de acceso e 25.01.2017]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.004>
1120. Moonen, H.; Van de Rakt, B.; Miller, I.; Van Nunen, J. y Van Hillegersberg, J. (2005). *Agent technology supports inter-organizational planning in the port. ERIM report series research in management, Erasmus Research Institute of Management*. (No. ERS-2005-027-LIS,) publicado también en: de Koster, R., Delfmann, W. (eds.) *Managing Supply Chains-Challenges and Opportunities*, pp: 1–21. Copenhagen Business School Press, Copenhague (Dinamarca). Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017]
<http://hdl.handle.net/1765/6636>
1121. Moorthy R.L. y Hock-Guan W. (2000). *Deadlock prediction and avoidance in an AGV system*. Master of Science, Sri Ramakrishna Engineering College, National University of Singapore. 69 páginas. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso e 25.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/2358716_Deadlock_Prediction_And_Avoidance_In_An_AGV_System
1122. Moorthy R.L.; Hock-Guan W.; Wing-Cheong, N. y Chung-Piaw, T. (2003). *Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone-controlled AGV system*. *International Journal of Production Economics*, vol. 83(3): 309–324. Disponible en [fecha de acceso e 25.01.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527302003705>
1123. Moorthy, R.L. y Teo, C.-P. (2006). *Berth management in container terminal: the template design problem*. *OR-Spektrum*, vol. 28(4): 495-518. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00291-006-0036-5>
1124. Moraes, L.A.M. y Faria, L.F.T. (2016). *A stochastic programming approach to liquefied natural gas planning*. *Pesquisa Operacional*, vol. 36(1). Recurso en línea. <http://dx.doi.org/10.1590/0101-7438.2016.036.01.0151>. Print version ISSN 0101-7438 On-line version ISSN 1678-5142 Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017]
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382016000100151
1125. Mostafavi, A.; Abraham, D.; DeLaurentis, D. y Sinfield, J. (2011). *Exploring the dimensions of systems of innovation analysis: a System of Systems framework*. *Proceedings of the Systems Journal*, vol. 5(2):256-265. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/224231086_Exploring_the_Dimensions_of_Systems_of_Innovation_Analysis_A_System_of_Systems_Framework

-
1126. Moura, A. y Oliveira, J.F. (2005). *A GRASP approach to the Container-Loading Problem*. IEEE Intelligent Systems, vol. 20(4): 50-57. Disponible en [fecha de acceso 23.02.2017] <https://www.computer.org/csdl/mags/ex/2005/04/x4050.html>
1127. Moura, A.; Oliveira, J.F. y Pimentel, C. (2013). *A Mathematical Model for the Container Stowage and Ship Routing Problem*. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research, vol. 12(3): 217-231. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 23.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/257582120_A_Mathematical_Model_for_the_Container_Stowage_and_Ship_Routing_Problem
1128. Moura, A. y Bortfeldt, A. (2016). *A two-stage packing problem procedure*. International Transactions in Operational Research, vol. 24(1-2): 43-58. Disponible en [fecha de acceso 23.02.2017] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/itor.12251/abstract;jsessionid=F6465FB83865345839E5C1CD941F0D34.f01t01>
1129. Moussi, R.; Ndiaye, N.F. y Yassine, A. (2012a). *Genetic Algorithm and new modelling to solve container location problem in Port*. The 1st International Maritime Transport and Logistics Conference: A Vision For Future Integration. (MARLOG-1) 18-20 Diciembre 2011, Alejandría (Egipto) 14 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://marlog-aast.org/2011/docs/papers/S.3.4.pdf>
1130. Moussi, R. ; Ndiaye, N.F. y Yassine, A. (2012b). *Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm (HGSAA) to Solve Storage Container Problem in Port*. Intelligent Information and Database Systems. Lecture Notes in Computer Science, vol. 7197(2012): 301-310. Publicado en Proceedings of the 4th Asian conference on Intelligent Information and Database Systems - Volume Part II (Marzo 2012). DOI: 10.1007/978-3-642-28490-8_32 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 23.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/262205686_Hybrid_Genetic_Simulated_Annealing_Algorithm_HGSAA_to_Solve_Storage_Container_Problem_in_Port?ev=auth_publication_detail
1131. Moussi, R. ; Euch, J.; Yassine, A. y Ndiaye, N.F. (2015). *A hybrid ant colony and simulated annealing algorithm to solve the container stacking problem at seaport terminal*. International Journal of Operational Research, vol. 24(4): 1-24. DOI: 10.1504/IJOR.2015.072723 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 23.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/272506882_A_hybrid_ant_colony_and_simulated_annealing_algorithm_to_solve_the_container_stacking_problem_at_seaport_terminal

-
1132. MRS (2017). *Global Automated Storage and Retrieval Systems Market 2017-2021*. Market Research Repots. INforme: TNV0417190 © TechNavio. 70 páginas. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://www.marketresearchreports.com/technavio/global-automated-storage-and-retrieval-systems-market-2017-2021>
1133. Mudrageda, M.V.; Murphy, F.H. y Welch, S. (2004). *Developing Strategies for Maritrans' Business Units*. Interfaces, vol. 34(2): 149-161. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://www.jstor.org/stable/25062889>
1134. Mudrageda, M.V. y Murphy, F.H. (2008). *An Economic Equilibrium Model of the Market for Marine Transportation Services in Petroleum Products*. Operations Research, vol. 56(2): 278-285. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] [doi>10.1287/opre.1070.0446](https://doi.org/10.1287/opre.1070.0446)
1135. Mullarney, A. (1996). *MODSIM III Tutorial*. Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference – Año 1996. Editado por J.M. Charnes, D. J. Morrice, D.T. Brunner y J.J. Swain. Páginas 542-546. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/077.pdf>.
1136. Munisamy, S. (2010). *Timber terminal capacity planning through queuing theory*. Maritime Economics & Logistics, vol. 12(2): 147-161. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://umexpert.um.edu.my/file/publication/00001676_57724.pdf
1137. Munitic, A.; Tonko, B.; Dusan, R. y Slavko, S. (1990). *Computer simulation of shipbuilding production process management*. Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Sociaty. (1990), pp: 812-825. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://www.systemdynamics.org/conferences/1990/proceed/pdfs/muniti812.pdf>
1138. Munitic, A y Šimundić, S. (2000). *System dynamic continuous computer simulation model of the 5th phase of the shipbuilding process -"launching"*. The 14th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding - In Memoriam Prof. Leopold Sorta. Rijeka: Faculty of Technical science, University of Rijeka. Rijeka (Croacia).
1139. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2002). *System Dynamics simulation model of the Port-Transshipments System*. Proceedings of the Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises (MITIP 2002), 27-29 de junio de 2002. Savvona (Italia), pp: 171-176.

1140. Munitic, A.; Bilic, M. y Dvornik, J. (2003a). *System Dynamics simulation and heuristic optimisation of cargo operation process in the harbours*. Nase more, vol. 50(3-4): 113-124.
1141. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2003b). *System Dynamics modelling of material flow of the port cargo system*. Proceedings of the 21st International Conference of the System Dynamic Sociaty (ISDC 2003), 20-24 de julio de 2003, Nueva York (Estados Unidos), vol. 1(1): 97-114.
1142. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2003c). *System Dynamics simulation model of the Port-Transshipments System Manager expert-logical complex fuctions: SKLOK, SKLOW and SKLOS*. Proceedings of the International Conference on Simulation and Multimedia in Engineering (ICSEE'03), septiembre 2003, Orlando (Florida, Estados Unidos), vol. 1(1): 83-87.
1143. Munitic, A.; Simundic, S. y Dvornik, J. (2003d). *Shipbuilding organization simulation modelling*, Proceedings of the 21st International System Dynamics Conference 2003 (ISDC 2003)), 20-24 de julio de 2003, New York (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 15.02.2017] <http://www.systemdynamics.org/conferences/2003/proceed/PAPERS/203.pdf>
1144. Munitic, A; Dvornik, J. y Slavko,S. (2003e). *System dynamics continuous computer simulation model of shipbuilding process*. Proceedings of the 1st Industrial Simulation Conference 2003, EUROSIS. (ISC 2003), 9-11 de junio de 2003, Valencia (España), vol. 1(1): 336-338
1145. Munitic, A; Dvornik, J. y Slavko, S. (2003f). *System dynamics continuous computer simulation model of shipbuilding process.*, The Society for Modelling and Simulation International Summer Computer Simulation Conference (SCSC 2003), 20-24 de Julio de 2003, Montreal (Canadá), vol. 1(1): 1-8.
1146. Munitic, A.; Dvornik, J. y Bilic, M. (2007). *Contribution to the investigation of the porttranshipment system using System Dynamics*. Proceedings of the 2nd International Conference on Ports and Waterways, 5-6 de Octubre de 2007, Vukovar (Croatia), vol. 1(1): 44-49. ISBN 978-953-243-019-6.
1147. Muravev, D.; Aksoy, S.; Rakhmangulov, A. y Aydogdu, V. (2016). *Comparing model development in discrete event simulation on Ro-Ro terminal example*. International Journal of Logistics Systems and Management, vol. 24(3): 283-297. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] [DOI: 10.1504/IJLSM.2016.076890](https://doi.org/10.1504/IJLSM.2016.076890)

-
1148. Murphy, P.R.; Daley, J.M. y Dalenberg, D.R. (1992). *Port Selection Criteria: An Application of a Transportation Research Framework*. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, vol. 8(3): 237-255. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/279619113_Port_selection_criteria_An_application_of_a_transportation_research_framework
1149. Murphy, P.R. y Hall, P. (1995). *The Relative Importance of Cost and Service in Freight Transportation Choice Before and After Deregulation: An Update*. Transportation Journal, vol. 35(1):30-38. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/268871065_The_Relative_Importance_of_Cost_and_Service_in_Freight_Transportation_Choice_Before_and_After_Deregulation_An_Update
1150. Murty, K.G.; Liu, J.; Wan, Y.W. y Linn, R. (2005). *A decision support system for operations in a container terminal*. Decision Support Systems, vol. 39(3): 309–332. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.dss.2003.11.002>
1151. Murty, K.G.; Liu, J.; Wan, Y.-w.; Zhang, C.; Tsang, M. y Linn, R. (2000). *DSS (decision support systems) for operations in a container shipping terminal*. Proceedings of the 1st Gulf Conference on Decision Support Systems, 6–8 de Noviembre de 2000, Kuwait (Kuwait), pp: 189–208. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www-personal.umich.edu/~murty/kuwait4.pdf>
1152. Mustafee, N. y Bischoff, E.E. (2011). *A multi-methodology agent-based approach for Container Loading*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Editado por S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, y M. Fu, pp: 234 – 245. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]
https://www.researchgate.net/publication/254050333_A_multi-methodology_agent-based_approach_for_Container_Loading
1153. Na, L. y Zhihong, J. (2009). *Optimization of Continuous Berth and Quay Crane Allocation Problem in Seaport Container Terminal*. Proceedings 2nd Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA '09. 10-11 de octubre de 2009, Zhangjiajie (China). DOI: 10.1109/ICICTA.2009.522. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017]
https://www.researchgate.net/publication/232643864_Optimization_of_Continuous_Berth_and_Quay_Crane_Allocation_Problem_in_Seaport_Container_Terminal

1154. Najib, M.; El Fazziki, A. y BoReino Unidoachour, J. (2012). *A container terminal management system*. Proceedings of the International Conference on Harbor Maritime and Múltimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS-2012). 19-21 de septiembre de 2012. Viena (Austria) ISBN 978-88-97999-11-9; Editado por Bruzzone, Gronalt, Merkuriev, Piera y Talley; pp: 118-127.
1155. Nakajima, S. y Bodek, N. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press, 11th Edition. Portland, Ore. (October 1988). 129 Páginas. ISBN-10: 0915299232 / ISBN-13: 978-0915299232
1156. Nam, K.C.; Kwak, K.S. y Yu, M.S. (2002). *Simulation study of container terminal performance* Journal of Waterway Port Coastal Ocean Engineering 128 (2002): 126–132. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-950X%282002%29128%3A3%28126%29?journalCode=jwped5>
1157. Narasimhan, A., y Palekar, U.S. (2002). *Analysis and algorithm for the transtainer routing problem in container port operation*. Transportation Science, vol. 36(1): 63–78. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.36.1.63.576?journalCode=trsc>
1158. Narsingh, D. (1979). *System simulation with digital computers*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 216 páginas. (re-editado en 1978 por PHI Learning y el 30 de Agosto de 2004 por Prentice-Hall of India Pvt.Ltd con ISBN-10: 8120300289 y ISBN-13: 978-8120300289).
1159. NASA (1966). *Procedure for Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). RA-006-013-1A.
1160. NASA (1995). *NASA Systems Engineering Handbook*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Technical Report. SP-610S. 164 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] http://spacecraft.ssl.umd.edu/design_lib/Systems_Eng_Handbook.pdf
1161. Nastasi, A. (2016a). *The impact of ExtendSIM on the industry*. Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference. Editado por T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and y S. E. Chick. Página 3592. Pendiente de publicación - Abstract disponible en [fecha de acceso 24.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc16papers/337.pdf>

-
1162. Nastasi, A. (2016b). *Innovative ExtendSIM solutions*. Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference. Editado por T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and y S. E. Chick. Página 3618. Pendiente de publicación - Disponible en [fecha de acceso 24.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc16papers/337.pdf>
1163. Naylor, T.; Balintfy, J. L.; Burdick, D. S. y Chu, K. (1966). *Computer simulation techniques*. New York: Wiley. 370 Páginas. ISBN-10: 0471630608 / ISBN-13: 978-0471630609
1164. Naylor, T. (1969). *The design of computer simulation experiments*. Durham NC: DReino Unidoe University Press. 417 Páginas. ISBN-10: 0822302322 / ISBN-13: 978-0822302322
1165. Nemhauser, G. L. y Yu, P. L. (1972). *A Problem in Bulk Service Scheduling*, Operations Research, vol. 20(4): 813-819. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/opre.20.4.813>
1166. Nešetřil, J.; Milková, E. y Nešetřilová, H. (2001). *Otakar Borůvka on minimum spanning tree problem Translation of both the 1926 papers, comments, history*. Discrete Mathematics, vol. 233(1-3): 03-36. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] [DOI: 10.1016/S0012-365X\(00\)00224-7](https://doi.org/10.1016/S0012-365X(00)00224-7)
1167. NetLogo (2016). *Netlogo*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
1168. NetLogo (2017). *Netlogo - References*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). REcurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/references.shtml>
1169. Neumann J.V. y Goldstine, H.H. (1947) *Numerical Inverting of Matrices of High Order*. American Mathematical Society Bulletin, Vol. 53(11). pp: 1021-1099.
1170. Nevins, M.R.; Macal, C.M. y Joines, J.(1995) *PORTSIM: An object-oriented port simulation*. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, Ottawa (Canada) (24-26 de Julio de 1995). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.osti.gov/scitech/biblio/95513>
1171. Nevins, M.R.; Macal, C.M.; Love, R. y Brogen, M.J. (1998a). *Simulation, animation and visualization of seaport operations*. SIMULATION: Transactions of The Society for

- Modeling and Simulation International vol. 71(2): 96-106. DOI: 10.1177/003754979807100204. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979807100204>
1172. Nevins, M.R.; Macal, y Joines, J.C (1998b): “A discrete-event simulation model for seaport operations”. SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, vol. 70(4): 96-106. DOI: 10.1177/003754979807000401 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979807000401>
1173. Newell, G.F. (1982). *Applications of Queuing Theory*. Chapman and Hall, New York. 3030 Páginas. ISBN-13: 978-9400959729. Reimpreso en 2013 por Springer. Ettore Majorana International Science Series (Book 4)
1174. Ng, W.C. (2005). *Crane scheduling in container yards with intercrane interference*. European Journal of Operational Research vol. 164(1): 64–78. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221703009251>
1175. Ng, W.C. y Mak, K.L. (2005a). *Yard crane scheduling in port container terminals*. Applied Mathematical Modelling, vol. 29(3): 263-275. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X04001167>
1176. Ng, W.C. y Mak, K.L. (2005b). *An effective heuristic for scheduling a yard crane to handle jobs with different ready times*. Engineering Optimization 37(8): 867-877 (Diciembre 2005). DOI: 10.1080/03052150500323849. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017]. https://www.researchgate.net/publication/245310608_An_effective_heuristic_for_scheduling_a_yard_crane_to_handle_jobs_with_different_ready_times
1177. Ng, W.C. y Tsang, W.S. (2005). *Scheduling yard crane in a port container terminal using genetic algorithm*. The 1st International Conference on Transportation Logistics (T-Log 2005), 27-29 de Julio de 2005; Singapore (Singapore).
1178. Ng, W.C. y Mak, K.L. (2006). *Quay crane scheduling in container terminals*. Engineering Optimization 38(6): 723-737 (September 2006). DOI: 10.1080/03052150600691038. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/245310651_Quay_crane_scheduling_in_container_terminals

-
1179. Ng, W.-C. y Wong, C.-S. (2006). *Evaluating the impact of vessel-traffic interference on container terminal capacity*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 132(2): 76-82, 2006. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:2\(76\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:2(76))
1180. Ng, W.C., Mak, K.L. y Tsang, W. (2006). *Scheduling yard crane in a port container terminal using genetic algorithm*. International Journal of Industrial Engineering 13(3): 246-253. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/295650779_Scheduling_yard_crane_in_a_port_container_terminal_using_genetic_algorithm
1181. Ng, W.C., Mak, K.L. y Zhang, Y.X. (2007). *Scheduling trucks in container terminals using a genetic algorithm*. Engineering Optimizacion, vol. 39(1): 33-47. <http://dx.doi.org/10.1080/03052150600917128>. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03052150600917128>
1182. Ng, T.-S. y Lam, S.-W. (2011). *Dynamic maritime systems inquiry: The DIVER approach*. Systems Engineering, vol. 14(3): 239–254. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sys.20175/abstract>
1183. Nguyen, V.D. y Kim, K. H. (2009). *A dispatching method for automated lifting vehicles in automated port container terminals*. Computers & Industrial Engineering, vol. 56(1): 1002–1020.
1184. Nicholls, S.; Amelung, B. y Student, J. (2016). *Agent-based modeling: A powerful tool for tourism researchers*. Journal of Travel Research. Publicación on-line antes de su edición el 3 de enero de 2016. Dsponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0047287515620490?journalCode=jtrb>
1185. Nicolau, S.N. (1967). *Berth Planning by Evaluation of Congestion and Cost*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of Waterways and Harbours Division. American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 93(4): 107-132.
1186. Nicolaou, S.N. (1969). *Berth planning by evaluation of congestion and cost*. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1969, vol. 95(3): 419-425.
1187. Nidhiry, N.M. y Saravanan, R. (2014). *Scheduling optimization of a flexible manufacturing system using a modified NSGA-II algorithm*, Advances in Production Engineering & Management, vol. 9(3): 107–154. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] http://apem-journal.org/Archives/2014/APEM9-3_139-151.pdf

1188. Nikolay, K. (2014). *System Analysis and Simulation Modeling as the Basis for Unique Design of Port Terminals for Bulk Handling*, Advanced Materials Research, Vols. 945-949, pp: 2907-2910. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/269366386_System_Analysis_and_Simulation_Modeling_as_the_Basis_for_Unique_Design_of_Port_Terminals_for_Bulk_Handling
1189. Nilsen, K.O. y Abdus-Samad, U. (1977). *Simulation and Queuing Theory in Port Planning*. Proceedings of Annual Symposium of American Society of Civil Engineers (ASCE), Ports, vol. 77 (1977): 196–211.
1190. Nilsson, H.; Courtney, A. y Peterson J. (2011). *Functional Reactive Programming. Continued**. Department of Computer Science – Yale University. 14 Páginas. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 21.11.2016] <http://haskell.cs.yale.edu/wp-content/uploads/2011/02/workshop-02.pdf>.
1191. Ning, Z. y Weijian, M. (2009). *A Model for the Stowage Planning of 40 Feet Containers at Container Terminals*. International Journal of Information Systems for logistics and Management, vol. 4(2): 41-49. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.603.7770&rep=rep1&type=pdf>
1192. Nishimura, E.; Imai A. y Papadimitriou, S. (2001). *Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms*. European Journal of Operational Research vol. 131(2): 282-292. Disponible en fecha de acceso 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/4869397_Berth_allocation_planning_in_the_public_Berth_system_by_genetic_algorithms_European_Journal_of_Operational_Research_131_282-292
1193. Nobx (2012) (noticia en línea publicada el 13 de abril de 2012). *Jade Scores Port of Doha* PortsandTerminals.com. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <http://www.portsandterminals.com/jade-scores-port-of-doha/>
1194. Nordgren, W. (1994). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceeding of the 27th Winter Simulation Conference (1994). Washington DC (Estados Unidos). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski y A.F. Seila. Páginas: 446-449. Disponible en [fecha de acceso 17.06.2017] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0064.pdf
1195. Nordgren, W. (1998). *Taylor II Manufacturing Simulation Software*. Proceeding of the 30th Winter Simulation Conference (1998). Editado por J.D. Tew, S. Manivannan, D.A.

- Sawosdki y A.F. Saila. Páginas: 263-270. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] http://www.informs-sim.org/wsc94papers/1994_0064.pdf
1196. Nordgren, W. B.: (2002). *FLEXIM Simulation Enviroment*. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference (editado por E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, y J. M. Charnes) Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] Páginas 250-252. <http://informs-sim.org/wsc02papers/032.pdf>
1197. Nordgren, W. B.: (2003). *Flexible simulation (Flexsim) software: Flexsim simulation environment*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (Editado por S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, y D. J. Morrice). Páginas 197-201 <http://informs-sim.org/wsc03papers/024.pdf>
1198. Nordhaus, W.D. (1973). *World Dynamics: Measurement without Data*. The Economic Journal, vol. 83(332): 1156-1183. Disponible en (fecha de último acceso el 29.11.2016) <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/worldodynamics.pdf>.
1199. Noritake, M. (1978). *A Study on Optimum Number of Berths in Public Wharf*. Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, Vol. 278(1978): 113-122. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] http://doi.org/10.2208/jscej1969.1978.278_113
1200. Noritake, M. (1985). *Congestion cost and pricing of seaports*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 111(2): 354-370. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(354#sthash.QEAbH0m5.dpuf](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(354#sthash.QEAbH0m5.dpuf)
1201. Noritake, M. y Kimura (1980). *A Study on Optimum Number of Berths in Public Wharf*. Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, Vol. 301(1980): 115-123. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] http://doi.org/10.2208/jscej1969.1980.301_115
1202. Noritake, M. y Kimura, S. (1983a). *Congestion Cost and Pricing of Seaports*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE) vol. 111(2): 354-370. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(354\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(354))
1203. Noritake, M. y Kimura, S. (1983b). *Optimum Number and Capacity of Seaport Berths*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 109(3): 323-339. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1983\)109:3\(323\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1983)109:3(323))

-
1204. Noritake, M. y Kimura, S. (1990). *Optimum Allocation and Size of Seaports*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 116(2): 287-299. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1990\)116:2\(287\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1990)116:2(287))
1205. Nørmark, K. (2013). *Programming Paradigms*. Department of Computer Science, Aalborg University, Aalborg (Dinamarca). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 01.05.2017]: http://people.cs.aau.dk/~normark/prog3-03/html/notes/paradigms_themes-paradigms.html
1206. Norrie, D. H.; Fauvel O.R. y Gaines B.R. (1989a). *A flexible manufacturing expert system*. Report 420, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad of Calgary, Alberta (Canadá).
1207. Norrie, D. H.; Fauvel, O.R. y Gaines B.R. (1989b). *Object—oriented planning, scheduling and simulation in manufacturing systems*. Report No. 421, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad of Calgary, Alberta (Canadá).
1208. Norrie, D.H.; Fauvel, O.R. y Gaines, B. R. (1990). *Object-oriented management planning systems for advanced manufacturing*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 3(6): 75–79. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1080/09511929008944468>
1209. North, M.; Macal, C.; Aubin, J. St.; Thimmapuram, P.; Bragen, M. Hahn, J.; Karr, J.; Brigham, N.; Lacy, M. y Hampton, D. (2009). *Multi-scale Agent-based Consumer Market Modeling*. Complexity, vol. 15(5): 37-47. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/220657403_Multiscale_Agent-Based_Consumer_Market_Modeling
1210. North, M.J.; Collier, N.T. y Vos, R.J. (2006). *Experiences creating three implementations of the Repast agent modeling toolkit*. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, vol. 16(1): 1–25. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://intersci.ss.uci.edu/wiki/pub/Repast10.1.1.99.9666.pdf>
1211. North, M.J.; Collier, N.T.; Ozik, J.; Tatara, E.R.; Macal, C.M.; Bragen, M. y Sydelko, P. (2013). *Complex adaptive systems modeling with repast symphony*. Complex Adaptive Systems Modeling 2013, Springer, Heidelberg, FRG, Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://www.casmodeling.com/content/1/1/3>

-
1212. Novaes, A. y Frankel, E. (1966). *A queuing modelling for unitilized Cargo Generation*. Journal of Operations Research, vol. 14(1): 100-132 Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] <https://doi.org/10.1287/opre.14.1.100>
1213. Nygaard, K y Dahl, O.-J. (1962). *SIMULA - An Extension of ALGOL to the Description of Discrete-Event Networks*. 2nd International Conference on Information Processing (IFIP 62 World Congress), Munich (Alemania) (1962).
1214. Nygaard, K., y Dahl. O.-J. (1981). *The development of the SIMULA languages*. Academic Press. History of programming languages (editado por R. L. Wexelblatt), New York (Estados Unidos).
1215. Nygaard, K., y O.-J. Dahl. (1978). *The development of the SIMULA languages*. ACM SIGPLAN Notices, vol. 13(8): 245–272.
1216. O'Donovan, T. M. (1976-1^a edición y 1979-2^a edición). *GPSS simulation made simple*. New York y Chichester (Reino Unido). Wiley. 140 Páginas. ISBN-10: 0471276146 / ISBN-13: 978-0471276142
1217. O'Reilly, J. J. y Lilegdon, W. R. (1999). *Introduction to AWESIM*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Editado por P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans. Páginas 196-221. Disponible en [fecha de acceso 24.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/025.PDF>
1218. Ofiara, D.D. (2002). *Natural resource damage assessments in the United States: rules and procedures for compensation from spills of hazardous substances and oil in waterways under US jurisdiction*. Marine Pollution Bulletin, vol. 44(1): 96–110. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00263-6)
1219. Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*. Productivity Press, Portland, Ore., 1988. 566 Páginas. ISBN-10: 143982097X / ISBN-13: 978-1439820971
1220. Okazaki, S. (1979a). *A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 1: Pedestrian Movement by the Application of Magnetic Models*. Transactions of Architectural Institute of Japan, n° 283 (1979): 111-119.
1221. Okazaki, S. (1979b). *A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 2 : Concentrated Pedestrian Movement*. Transactions of Architectural Institute of Japan, n° 284 (1979): 120-137.

1222. Okazaki, S. (1979c). *A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 3: Along the Shortest Path, Taking Fire. Congestion and Unrecognized Space into Account*. Transactions of Architectural Institute of Japan, nº 285 (1979): 137-147
1223. Okazaki, S. y Matsushita, S. (1993). *A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing*. 10 páginas. Department of Architecture and Environmentall Design, Architecture and Environmentall Engi-neering, Kyoto University, Kyoto (Japón) y Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fuki University, Fuki (Japón). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] <http://www.mReino Unidoogawa-u.ac.jp/~okazaki/OK/PMOVE/paper1/London.pdf>
1224. Omer, M., Mostashari, A., Nilchiani, R., y Mansouri, M. (2012). *A Framework for Assessing Resiliency of Maritime Transportation Systems*. Maritime Policy & Management: The Flagship Journal of International Shipping and Port Research, vol. 39(2012): 685-703. Disponible en [fecha de acceso 15.02.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088839.2012.689878>
1225. Öñüt, S. y Saglam, C.Ö. (2007) *Modelling and Optimization of General Cargo Port Operations through fuzzy minimal spanning three and fuzzy dynamic programming approaches*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol. 4(8): 1835-1851. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] <http://www2.kuma.u-tokai.ac.jp/~shi/07-147-1.pdf>
1226. Öñüt, S. y Saglam, C.Ö. (2008). *Modeling and optimizacion of general cargo port operations though fuzzy minimal spanning tree and fuzzy dinamica programming approached*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control vol. 4(8): 1835—1851. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/286805347_Modeling_and_optimization_of_general_cargo_port_operations_through_fuzzy_minimal_spanning_tree_and_fuzzy_dynamic_programming_approaches
1227. Oracle (2016). *Java 1995-2015: 20 Years*. Oracle Corporation, Redwood (San Francisco, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://oracle.com.edgesuite.net/timeline/java/>
1228. Ottjes, J.A. y Lodewijks, G. (2004). *Reliability of large scale conveyor systems*. Proceedings of the International Industrial Simulation Conference (ISC 2004), 7-9 de Junio de 2004, Málaga (España), pp: 324-329. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://wbmttt.tudelft.nl/users/duinkerker/papers/mal0406a.pdf>

-
1229. Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. y Schott D.L. (2007). *Bulk terminal modelling and simulation*. Proceedings of the 5th International Industrial Simulation Conference (ISC 2007), 13-15 de junio de 2007, Delft (Holanda). 5 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://wbmttt.tudelft.nl/users/duinkerker/papers/LOGIS-07%20Delft%202007.pdf>
1230. Øvstebøa, B.O.; Hvattuma, L.M.; y Fagerholt K. (2011a). *Routing and scheduling of RoRo ships with stowage constraints*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 19(6): 1225–1242. DOI: 10.1016/j.trc.2011.02.001. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.11.2016]. https://www.researchgate.net/publication/251630820_Routing_and_scheduling_of_RoRo_ships_with_stowage_constraints
1231. Øvstebøa, B.O.; Hvattuma, L.M.; y Fagerholt K. (2011b). *Optimization of stowage plans for RoRo ships*. Computers & Operations Research, vol. 38(10): 1425–1434. Disponible en [fecha de acceso 24.11.2016]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811000086>
1232. Özelkana, E.C.; D'Ambrosio, A. y Tenga. S.G. (2008). *Optimizing liquefied natural gas terminal design for effective supply-chain operations*. International Journal of Production Economics, vol. 111(2): 529–542. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527307000977>
1233. Özkan, E.D.; Nas, S. y Güler, N. (2016). *Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method*. The Asian Journal of Shipping and Logistics, vol. 32(3): 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2016.09.002>. Disponible en [fecha de acceso 27.05-2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209252121630044X>
1234. Oztanriseven, F.; Pérez-Lespier, L.; Long, S. y Nachtmann, H. (2014). *A Review of System Dynamics in Maritime Transportation*. Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference. Editado por Y. Guan y H. Liao. 10 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://transportation.mst.edu/media/research/transportation/documents/publications/A%20Review%20of%20System%20Dynamics%20in%20Maritime%20Transportation.pdf>
1235. Pachakis, D. y Kiremidjian, A.S. (2003). *Ship traffic modeling methodology for ports*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 129(5): 193-202, 2003. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129:3A5\(193\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:3A5(193))

-
1236. Padberg, M. y Rinaldi, G. (1991). *A Branch-and-Cut Algorithm for the Resolution of Large-Scale Symmetric Traveling Salesman Problems*. Annals of Operations Research, vol. 50(1): 37–59. Disponible en [fecha de acceso 22.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007%2F02085634>
1237. Page E.H. y Tufarolo, J. (1997). *An Interview with Philip J. Kiviat*. Association for Computing Machinery, Inc. Recuso en línea. Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://www.acm-sigsim-mskr.org/Articles/KiviatInterview/kiviatInterview.htm>
1238. Page, E. (1972). *Queueing Theory in OR*. Butterworths, London. ISBN 0844800163. (196 páginas)
1239. Page, E. (1982). *Tables of waiting times for M/M/n, M/D/n and D/M/n and their use to give approximate waiting times in more general queues*. Journal Operational Research Society, vol. 33(5): 453 – 473. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] DOI: [10.1057/jors.1982.94](https://doi.org/10.1057/jors.1982.94)
1240. Panda, D.K.; Basak, D.; Dai, D. Kesavan, R.; Sivaram, R.; Banikazemi, M. y Moorthy V. (2007). *Simulation of modern parallel systemas: A CSIM-Based Approach*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Páginas: 1013 – 1020. Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/1013.PDF>
1241. Park, C. S. y Noh, Y.D. (1987a). *A port simulation model for bulk cargo operations*. SIMULATION, vol. 48(6): 236-246. doi>10.1177/003754978704800605. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://sim.sagepub.com/content/48/6/236>
1242. Park, C. S. y Noh, Y.D. (1987b). *An interactive port capacity expansion simulation model*. Engineering Costs and Production Economics, vol. 11(1): 109-124. DOI: 10.1016/0167-188X(87)90034-6. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/222206709_An_interactive_port_capacity_expansion_simulation_model
1243. Park, B.C. (1991). *Analytical models and optimal strategies for automated storage/retrieval system operations*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA; 1991. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/27539670_Analytical_models_and_optimal_s_trategies_for_automated_storageretrieval_system_operations

-
1244. Park, B.C. (1999). *Optimal dwell point policies for automated storage/retrieval systems with dedicated storage*. IIE Transactions, vol. 31(10): 1011—1013. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] DOI: [10.1023/A:1007687818042](https://doi.org/10.1023/A:1007687818042)
1245. Park, B.C. (2001). *An optimal dwell point policy for automated storage/retrieval systems with uniformly distributed, rectangular racks*. International Journal of Production Research, vol. 39(7): 1469-1480. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540010023583>
1246. Park, Y. M. y Kim, K. H. (2002). *Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique*. The Journal of the Operational Research Society, 53(9): 1054-1062. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 18.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fpalgrave.jors.2601412>
1247. Park, Y.-M. (2003). *Berth and crane scheduling of container terminals*. PhD Thesis, Pusan National University. Pusan (Corea del Sur).
1248. Park, Y. M. y Kim, K. H. (2003). *A scheduling method for Berth and Quay cranes*. Capítulo en *Container Terminals and Automated Transport Systems*, pp: 159-181. Editado por H.O.Günther y K.H.Kim ISBN: 978-3-540-22328-3 (Print) 978-3-540-26686-0 (Online). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 18.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/291141785_A_scheduling_method_for_Berth_and_Quay_cranes
1249. Park, B.C.; Foley, R.D., White, J.A. y Frazelle E.H. (2003). *Dual command travel times and miniload system throughput with turnover-based storage*. IIE Transactions, vol. 35(4): 343-355. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/07408170304375>
1250. Park, N.K.; Seo, C.G.; Choi, H.R.; Dragović, B.; Chen, T.; Lee, Y.C.; Lim, S.Y.; Cho, K.S. y Lee, J.Y. (2006). *A Study on Improvement of Calculation System of Optimal Throughput per Berth in Korea Container Terminal*. Final Report for Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (MOMAF), Busan (Corea del Sur), 2006.
1251. Park, B.C.; Foley, R.D. y Frazelle, E.H. (2006a). *Performance of miniload systems with two-class storage*. European Journal of Operational Research, vol. 170(1): 144-155. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.057>
1252. Park, N.K.; Dragović, B.; Meštrović, R. Y Kim, J.Y. (2007). *Simulation and analysis of container terminals operations – case study: Korean ports*. Modelling and Optimization in the Machines Building Field, MOCM – 13, Vol. 3(2007): 171-180.

-
1253. Park, N.K. y Dragović, B. (2008). *Simulation study of container terminal throughput optimization*. Proceedings of the 8th International Conference Research and Development in Mechanical Industry (RaDMI 2008), 14-17 de Septiembre de 2008, Užice, Serbia, pp: 78-89.
1254. Park, N.-K. y Dragović, B. (2009). *A Study of Container Terminal Planning*. FME Transactions (2009) vol. 37(1): 203-209. Disponible en [fecha de acceso 18.10.2016] http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol37/4/06_n-kpark.pdf
1255. Park, T.; Choe, R.; Kim, Y. H. y Ryu, K. R. (2011). *Dynamic adjustment of container stacking policy in an automated container terminal*. International Journal of Production Economics, vol. 133(1): 385-392. Disponible en [fecha de acceso 18.10.2016] <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.03.024>
1256. Park, N.-K., D.S. Moony Lim, C.-K. (2012a). *Port Choice Model of Transshipment Cargo Using System Dynamics*. Maritime Logistics Contemporary Issues (Editado por D.-W. Song, y P. Panayides),. Emerald Group Publishing Limited. Pp: 69-90. ISBN 9781780523408. Disponible en [fecha de acceso 25.02.2017] <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/9781780523415-005>
1257. Park, N.-K.; Dragović, B.; Zrnić, N. y Moon, Daniel S-H (2012b). *Simulation Approach of Container Terminal Modelling*. The 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD 2012), Vienna University of Technology, Viena(Austria). 6 Páginas. Disponible en [fecha de última consulta el 25.02.2017] http://seth.asc.tuwien.ac.at/proc12/full_paper/Contribution218.pdf
1258. Park, N.-K.; Yoon, D.-g. y Park, S.-k. (2013). *Study on performance indicators at seaport*. Proceedings of the 6th International Conference of Asian Shipping and Logistics, pp: 257-268.
1259. Park, N.-k.; Yoon, D.-g. y Park, S.-k. (2014). *Port Capacity Evaluation Formula for General Cargo*. The Asian Journal of Shipping and Logistics, vol. 30(2): 175-192. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2014.09.003>
1260. Parker, M. (1999). *Ascape: an Agent Based Modeling Environment in Java*. Proceedings of Agent Simulation: Applications, Models, and Tools. University of Chicago, Chicago (Estados UNidos). 15-16 de Octubre de 1999. Editado por Charles M. Macal y David Sallach. Páginas: 149-174. Disponible en [fecha de acceso 25.02.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.8708&rep=rep1&type=pdf>

-
1261. Parker, M. (2000). *Ascape: Abstracting Complexity*. Proceedings of the Swarmfest 2000. Natural Resources and Environmental Issues, vol. 8, artículo 5, pp: 22-30. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.02.2017] <http://digitalcommons.usu.edu/nrei/vol8/iss1/5>
1262. Parker (2001). *What is Ascape and Why Should You Care?*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 4(1), Recurso en línea (ISSN 1460-7425). Disponible en [fecha de acceso 25.02.2017] <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/1/5.html>
1263. Parker, D.C.; Manson, S.M.; Janssen, M.A.; Hoffmann, M.J. y Deadman, P. (2003). *Multi-agent systems for the simulation of land-use and landcover change: A review*. Annals of the Association of American Geographers, vol. 93(2): 314–337. (previamente presentado en Special Workshop on Agent-Based Models of Land Use, 4-7 de Octubre de 2002, Irvine, California, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.02.2017] http://www.csiss.org/events/other/agent-based/papers/maslucc_overview.pdf
1264. Parker J., y Epstein, J. (2011). *A Distributed Platform for Global-scale Agent-based Models of Disease Transmission*. Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), Association for Computing Machinery (ACM), vol. 22(1), artículo 2. 29 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 24.03.2017] http://www.pacercenter.org/media/18834/parker%20epstein%20gsam.pdf?origin=publication_detail
1265. Parola, F. y Sciomachen, A. (2005). *Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models*. International Journal of Production Economics 97(1): 75-88. DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.06.051. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222780369_Intermodal_container_flows_in_a_port_system_network_Analysis_of_possible_growths_via_simulation_models
1266. Parola, F. y Sciomachen, A. (2009). *Modal split evaluation of a maritime container terminal*. Maritime Economics & Logistics, vol. 11(1): 77-97. doi:10.1057/mel.2008.22. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/24110603_Modal_split_evaluation_of_a_maritime_container_terminal.
1267. Parreño, F.; Alvarez-Valdes, R.; Oliveira J.F. y Tamarit J.M. (2007). *A maximal-space algorithm for the container loading problem*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Valencia. (Valencia, España). 25 Páginas.

- Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]
<http://www.uv.es/sestio/TechRep/tr03-07.pdf>
1268. Pawlas, K. y Zall, D. (2012). *Analysis of Forecasting Methods and Applications of System Dynamics and Genetic Programming: Case Studies on Country Throughput*. Master Thesis para la obtención del grado de Master of Science in Computer Science. School of Computing. Blekinge Institute of Technology - Karlskrona (Suecia). 90 Páginas. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] www.diva-portal.org/smash/get/diva2:829407/FULLTEXT01.pdf
1269. Pegden, C.D. y Pritsker A. (1979). *SLAM: Simulation Language for Alternatives Modeling*. Simulation. Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, vol. 33(5): 145-157. DOI: 10.1177/003754977903300502. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/242924677_SLAM_Simulation_language_for_alternative_modeling
1270. Pegden, C. D. (1982). *Introduction to SIMAN*. Systems Modeling Corporation. Publicado con posteridad en Proceedings del 16th Winter Simulation Conference 1984. Páginas 34-41. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=800013.809430>
1271. Pegden, C.D. (1990). *Introduction to simulation with SIMAN*. Universidad de Michigan. Ed. McGraw-Hill. 615 páginas. ISBN 0070492174 y 9780070492172.
1272. Pegden, C.D. y Davis, D.A. (1992). *Arena: a SIMAN/Cinema-based hierarchical modeling system*. Proceedings of the 1992 – 24th Winter Simulation Conference. (ISBN:0-7803-0798-4), pp: 390-399. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.06.2017] Disponible en [fecha de acceso 10.02.2017] [doi>10.1145/167293.167390](https://doi.org/10.1145/167293.167390)
1273. Pegden, C.D.; Shannon, R.E. y Sadowski, R.P. (1995). *Introduction to Simulation Using SIMAN*. McGraw-Hill, 1995 - 600 páginas, ISBN 0071138102, ISBN13 9780071138109.
1274. Pegden, C.D. (2007). *SIMIO: A new simulation system based on intelligent objects*. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference (editado por S.G. Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, J.D. Tew, y R.R. Barton). Páginas: 2293-2300.
1275. Pegden, C.D. y Sturrock D. (2013). *Rapid Modeling Solutions: Introduction to Simulation and Simio*. CreateSpace Independent Publishing Platform (ISBN-13: 978-1492967132 ISBN-10: 1492967130). 130 Páginas

-
1276. Peng, J.; Zhou, Z. y Li, R. (2015). *A Collaborative Berth Allocation Problem with Multiple Ports Based on Genetic Algorithm*. Journal of Coastal Research: Special Issue 73 - Recent Developments of Port and Ocean Engineering (2015), pp: 290-297. doi: <http://dx.doi.org/10.2112/SI73-051.1> Disponible en [fecha de acceso 10.02.2017] <http://www.bioone.org/doi/abs/10.2112/SI73-051.1?journalCode=coas>
1277. Perakis, A. N. y Bremer, W.M. (1992). *An operational tanker scheduling optimization system: Background, current practice and model formulation*. Maritime Policy & Management, vol. 19(3): 177-187. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] DOI: [10.1080/751248659](https://doi.org/10.1080/751248659)
1278. Pérez, F. y López, A. (2001). *A 2D model to study evacuation of ship passengers*. Proceedings of the 2nd International Conference Navys and Shupbuilding Nowadays (NSN'2002), San Petesburgo (Rusia).
1279. Pérez, F. y López, A. (2003). *A cellular models applied to the evacuation of ship passengers*. Proceedings of the International Congress on Ship and Shipping Research, (NAV'2003), 24-27 de junio de 2003, Palermo (Italia). ISBN-8890048719, ISBN13-9788890048715.
1280. Pérez, F.; López, A.; Péter, E. y Donoso, S. (2005). *Simulación del Movimiento de Personas. Aplicación a la Evacuación de Buques*. Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial (RIAI), vol. 2(4): 78-88. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/28141917_Simulacion_del_Movimiento_de_Personas_Aplicacion_a_la_Evacuacion_de_Buques
1281. Pérez, F. (2008). *La evacuación de buques de guerra. Estudio del Movimiento de Personas en Situaciones de Emergencia*. Tesis Doctoral. Departamento de Arquitectura y Construcciones Navales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España). Director: Jose María Arriola Rodríguez. 254 Páginas Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] http://oa.upm.es/1874/1/Francisco_Javier_Perez_Villalonga.pdf
1282. Persson, J. A. y Göthe-Lundgren, M. (2005). *Shipment planning at oil refineries using column generation and valid inequalities*. European Journal of Operational Research, vol. 163(3): 631-652. Disponible en [fecha de acceso 25-12-2013] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.02.008>
1283. Petering, M.E.H. (2009). *Effect of block width and storage yard layout on marine container terminal performance*. Transportation Research Part E: Logistics and

- Transportation Review, vol. 45(4): 591-610. Disponible en [fecha de acceso 10.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554508001518>
1284. Petering, M.E.H. y Murty, K.G. (2009). *Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal*. Computers & Operations Research, vol. 36(5): 1711-1725. Disponible en [fecha de acceso 10.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054808000798>
1285. Petering, M.E.H.; Wu, Y.; Li, W.; Goh, M. y de Souza, R. (2009). *Development and simulation analysis of real-time yard crane control systems for seaport container transshipment terminals*. OR Spectrum, vol. 31(4): 801-835. Disponible en [fecha de acceso 10.10.2016] [doi:10.1007/s00291-008-0142-7](https://doi.org/10.1007/s00291-008-0142-7)
1286. Peterkofsky, R.I. y Daganzo, C.F. (1990). *A branch and bound solution method for the crane scheduling problem*. Transportation Research Part B, vol. 24(3): 159–172. Disponible en [fecha de acceso 10.10.2016]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019126159090014P>
1287. Pin, F.G. y Watanabe, Y. (1993). *Driving a car using reflexive fuzzy behaviors*. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 2, pp: 1425-1430. 28 Marzo – 1 Abril 1993, San Francisco (California, Estados Unidos) Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] [DOI: 10.1109/FUZZY.1993.327602](https://doi.org/10.1109/FUZZY.1993.327602)
1288. Pisinger, D. (2002). *Heuristics for the container loading problem*. European Journal of Operational Research, vol. 141(2): 382-392. Disponible en [fecha de acceso 10.12.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00132-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00132-7)
1289. Plumlee, C.H. (1966). *Optimum Size Seaport*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers Journal of Waterways and Harbours Division. American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 92(3): 1-24.
1290. Pollazzek, F. (1930a). *Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie*. Mathematische Zeitschrift., vol. 32(1): 64-100 y 729-750. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] [DOI 10.1007/bf01194620](https://doi.org/10.1007/bf01194620).
1291. Pollazzek, F. (1930b). *Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie II (Mitteilung aus dem Telegraphentechnischen Reichsamt)*. Mathematische Zeitschrift., vol. 32(1): 64-100. ISSN: 0025-5874; 1432-1823. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] <http://eudml.org/doc/168256>

-
1292. Pollazzek, F. (1934). *Über das Wasserproblem*. Mathematische Zeitschrift, vol. 38(1): 492-537
1293. Pollazzek, F. (1952) *Fonctions caractéristiques de certaines répartitions définies au moyen de la notion d'ordre*. Comptes rendus de l'Académie des Sciences (C.R. Acad. Sci.), Paris (Francia), vol. 234, pp: 2334-2336.
1294. Poole, T., y Szymankewicz, J. (1977). *Using simulation to solve problems*. McGraw-Hill (London). 276 Páginas. ISBN-10: 0070844720 / ISBN-13: 978-0070844728.
1295. Pooley, R.J. (1987). *An Introduction to Programming in SIMULA*. Alfred Waller Ltd (Oxford, febrero 1987). 344 Páginas. ISBN-13: 978-0632014224 / ISBN-10: 0632014229.
1296. Popa, A. y Strer, J. (2016). *Analysis of Passenger and Vehicle Flows with Microscopic Simulations as a Result of Security Checks at Ferry Terminals*. Transportation Research Procedia, vol. 14, 2016, pp: 1384-1393. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516302137>
1297. PORTeC (2017). *Limen: Port Simulator*. Centre of Transports, Department of Civil and Environmental Engineering. Imperial College. © 2017 Imperial College London, Londres (Reino Unido). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 27.10.2016] <http://www.imperial.ac.uk/research/transport-studies/port-operations/research/>
1298. Port Technology (2009) (noticia en línea publicada el 10 de junio de 2009): *Messina Line selects Jade Master Terminal*. Port Technology (© Maritime Information Services Ltd). Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <https://www.porttechnology.org/news/messina-line-selects-jade-master-terminal>
1299. Powell, W.B. y Carvalho, T.A. (1998). *Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations*. Transportation Science 32(2): 110–126. (1998). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 27.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/2364767_Real-Time_Optimization_of_Containers_and_Flatcars_for_Intermodal_Operations
1300. Pradhana, S.K.; Parhib, D.R. y Pandey A.K. (2009). *Fuzzy logic techniques for navigation of several mobile robots*. Applied Soft Computing, vol. 9(1): 290–304. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2008.04.008>
1301. Prais, M. y Ribeiro, C.C. (2000). *Reactive GRASP: An application to a matrix decomposition problem in TDMA traffic assignment*. INFORMS Journal on Computing

- vol. 12(1): 164-176. <https://doi.org/10.1287/ijoc.12.3.164.12639>. Disponible en [fecha de acceso 27.10.2016]
<https://pdfs.semanticscholar.org/8000/29086a84b4daffa3c84ad1d48cb318b819cf.pdf?ga=1.115801861.2090556174.1478134489>
1302. Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A. y Vetterling, W. T. (1992). *Van Wijngaarden-Dekker-Brent Method. Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing* (2nd Edition, 1992). Cambridge University Press, pp: 352-355, Cambridge (Reino Unido). ISBN-10: 052143064X / ISBN-13: 978-0521430647
1303. Preston, P., y Kozan, E. (2001). *An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals*. Computers & Operations Research, vol. 28(10): 983-995. DOI: 10.1016/S0305-0548(00)00020-4. Disponible en [fecha de acceso 27.10.2016]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054800000204>
1304. Prim, R.C. (1957). *Shortest connection networks and some generalizations*. Bell System Technical Journal, vol. 36, noviembre 1957, pp: 1389-1401. Disponible en [fecha de acceso 27.10.2016]
<http://bioinfo.ict.ac.cn/~dbu/AlgorithmCourses/Lectures/Prim1957.pdf>
1305. Pritsker, A.A.B. y Kiviat, P.J. (1969). *Simulation with GASP-II: a FORTRAN based simulation language*. Prentice-Hall series in automatic computation. Ed. Prentice-Hall. 332 páginas. ISBN-10: 0138104247 / ISBN-13: 978-0138104245.
1306. Pritsker, A.A.B. y Hurst, N.R. (1973) *GASP IV: A combined continuous - discrete FORTRAN-based simulation language*. SAGE Journals, vol.21(3): 65-70. Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017]
<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/003754977302100302>
1307. Pritsker, A.A.B. (1974a). *The GASP IV Simulation Language*. John Wiley & Sons, New York (Estados Unidos). (1^a Edición 3 de julio de 1974). 470 páginas ISBN-10: 0471700452 / ISBN-13: 978-0471700456
1308. Pritsker, A.A.B. (1974b). *The GERTE user's manual*. Pritsker & Associate, Inc., West Lafayette, IN. No localizado pero refenciado en Wilson y Goldsman (2001).
1309. Pritsker, A.A.B.; Wortman, D.B.; Chubb, G.P. y Seifert, D.J. (1974). *SAINT: systems analysis of integrated networks of tasks*. Proceedings of the Pittsburgh Modeling and Simulation Conference, Pittsburgh (Estados Unidos) pp: 1201-1205.

-
1310. Pritsker, A.A.B. y Young, R.E. (1975). *Simulation with GASP PL/1: A PL/1 Based Continuous/Discrete Simulation Language*. John Wiley & Sons, New York. 352 páginas. (1ª Edición 1 de enero de 1976) ISBN-10: 0471700460 / ISBN-13: 978-0471700463.
1311. Pritsker, A.A.B. (1977). *Modeling and Analysis Using Q-GERT Networks*. Halsted Press, John Wiley & Sons, New York. (1ª Edición 1977, 2ª Edición 1979). 480 páginas. ISBN-10: 0470266481 / ISBN-13: 978-0470266489
1312. Pritsker, A.A.B. (1979). *Gasp: Present Status and Future Prospects*. Capítulo 4, pp: 61-70 del libro “*Current Issues in Computer Simulation*” editado por Adam, N.R. y Drogramaci, A. Academic Press Inc. London Ltd – Londres (Reino Unido). ISBN: 0-12-044120-9.
1313. Pritsker, A.A.B. y Pegden, C.D. (1979). *Introduction to Simulation and SLAM*. Halsted Press, John Wiley & Sons, New York (1ª Edición 11 de abril de 1979). 588 páginas. ISBN-10: 0470265884 / ISBN-13: 978-0470265888.
1314. Pritsker, A.A.B. (1984). *Introduction to Simulation and SLAM II*. 2ª edición, Halsted Press, John Wiley & Sons, New York. (3ª edición en 1986 y 4ª edición en 1995). Consultado en su 4ª Edición. Publicado por Wiley (31 enero 1995). 839 Páginas. ISBN-10: 0470234571 / ISBN-13: 978-0470234570
1315. Pritsker, A. A. B. (1986). *Introduction to Simulation and Slam II*. Westlafayette, Systems Publishing Corporation. Consultada la 4ª edición. New York, John Wiley & Sons (4ª edición, 31 de enero de 1995). 839 páginas. ISBN-10: 0470234571 / ISBN-13: 978-0470234570.
1316. Pritsker, A.A.B.; Grant, F.H. y Duket, S.D. (1986a). *Simulation and real time factory control*. Paper presentado en CASA/SME Real Time Factory Control Seminar, 13- 15 May 1986 (Chicago) y reimpreso en páginas 472-483 de Pritsker, A.A.B. (1990)
1317. Pritsker, A. A. B.; Rolston, L.J. y Floss, P. (1986b). *Introduction to Simulation and Slam II, Solutions Manual*. Systems Publishing Corporation ©1986 (editado junio 1986). 305 páginas ISBN:0938974017. ISBN-13: 978 - -0938974017.
1318. Pritsker, A.A.B.; Sigal, C. E. y Hammesfahr, R. D. J. (1989). *SLAM II. Network Models for Decision Support*. New Jersey, Prentice-Hall. 704 páginas. ISBN-10: 0138128197 - ISBN-13: 978-0138128197

1319. Pritsker, A.A.B. (1990). *Papers, Experiences, Perspectives, Systems*. Publishing Corporation, West Lafayette, IN. Consultado en edición de Scientific Press Inc. (1 de diciembre de 1993) 547 Páginas. ISBN-10: 0894262459 / ISBN-13: 978-0894262456.
1320. Pritsker, A.A.B. y O'Reilly, J.J. (1996). *AweSim: the integrated simulation system*. Proceedings of the 28th Winter Simulation Conference, 08-11 de diciembre de 1996, Coronado (California, Estados Unidos). © IEEE Computer Society Washington DC (Estados Unidos). Páginas 481-484. ISBN:0-7803-3383-7. Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/067.pdf>
1321. Pritsker, A.A.B.; O'Reilly, J.J. y LaVal, D.K. (1997). *Simulation with Visual SLAM and AweSim*. John Wiley & Sons, New York. Consultado en 2ª Edición (19 de Marzo de 1989). 852 Páginas. ISBN-10: 0471352934 / ISBN-13: 978-0471352938
1322. Pritsker, A.A.B. y O'Reilly, J. (1999). *Simulation with Visual SLAM and AweSIM*. 2nd Edition Systems Publishing Corporation. Indiana (EEUU)- Editado por Alan B. Pritsker y Jean J. O'Reilly. 890 Páginas. ISBN 0471352934. También referenciado como John Wiley & Sons (2ª edición, 19 de marzo de 1999, New York). 852 páginas ISBN-10: 0471352934 / ISBN-13: 978-0471352938.
1323. Pritsker Corporation. (1989). *SLAM SYSTEM: total simulation Project support*. Pritsker Corporation, Indianapolis, IN. No localizado pero refenciado en Wilson y Goldsman (2001).
1324. Promodel (2012). *Welcome to NewPromodel Blog*. Promodel Corporation. Allentown (Pensilvania, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de último acceso el 25.06.2017] <http://blog.promodel.com/2012/07/26>
1325. Prudius, A. A., y Andradóttir, S. (2004). *Simulation optimization using balanced explorative and exploitative search*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Editado por R.G. Ingalls, M.D. Rossetti, J.S. Smith, y B.A. Peters, pp: 545-549. Piscataway (New Jersey, Estados Unidos). © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.09.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/b2b0/2a7cad2bf5470606ffe05325696c60fd3bf8.pdf>
1326. Prudius, A. A. (2007). *Adaptive random search methods for simulation optimization*. Ph.D. thesis, H. Milton. Stewart School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta (Georgia, Estados Unidos). 152 páginas. Disponible en [fecha de acceso 10.02.2017] <https://pdfs.semanticscholar.org/8caf/61d95d77844fc3f888d7f2c57087add566c3.pdf>

-
1327. Psarros, G.; Skjong, R. y Vanem, E. (2011). *Risk acceptance criterion for tanker oil spill risk reduction measures*. Marine Pollution Bulletin, vol. 62(1): 116-127. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.09.003. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] https://www.researchgate.net/publication/47298568_Risk_acceptance_criterion_for_tanker_oil_spill_risk_reduction_measures
1328. Puckett, R. R. (2009). *Multi-Agent Crowd Behavior Simulation for Tsunami Evacuation*. Master Thesis, Department of Information and Computer Sciences, University of Hawaii, Hawaii (Estados Unidos). 37 páginas Disponible en [fecha de acceso 10.02.2017] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.8632&rep=rep1&type=pdf>.
1329. Pugh, A.L., III, (1963). *DYNAMO user's manual*. MIT Press. (Massachusetts, Estados Unidos). 57 páginas.
1330. Pugh, A.L., III, (1986). *Professional DYNAMO Plus Reference Manual*. 5 Lee St, Cambridge (Massachusetts, Estados Unidos) Pugh-Roberts Associates.
1331. Qiu, L. y Hsu, W-J. (2000). *Conflict-free AGV routing in a bi-directional path layout*. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Integrated Manufacturing (ICCIM'2000), 28–30 Mayo 2000, Singapore (Singapore), vol. 1, pp: 392–403. © Gintic Institute of Manufacturing Technology, Singapore (Singapore).
1332. Qiu, L. y Hsu, W-J. (2001a). *Adapting sorting algorithms for routing AGVs on a mesh-like path topology*. Technical Report CAIS-TR-00-28, School of Applied Science, Centre for Advanced Information Systems, Nanyang Technological University, Nanyang (Singapore). Disponible en [fecha de acceso 20.06.2016] <https://pdfs.semanticscholar.org/6965/e2f8e8548846603f5cabd4e41d32f4a20a85.pdf?ga=2.117311361.62863643.1497767513-1805517602.1497767513>
1333. Qiu, L. y Hsu, W-J. (2001b). *Scheduling of AGVs in a mesh-like path topology*. Technical Report CAIS-TR-01-34, School of Applied Science, Centre for Advanced Information Systems, Nanyang Technological University, Nanyang (Singapore).
1334. Qiu, L. y Hsu, W-J. (2001c). *Scheduling of AGVs in a mesh-like path topology (II): a case study in a container terminal*. Technical Report CAIS-TR-01-35, School of Applied Science, Centre for Advanced Information Systems, Nanyang Technological University, Nanyang (Singapore). Disponible en [fecha de acceso 20.06.2016] https://www.researchgate.net/publication/228410288_Scheduling_of_AGVs_in_a_mesh-like_path_topology_II_a_case_study_in_a_container_terminal

1335. Qiu, L.; Hsu, W-J.; Huang, S. Y. y Wang, H. (2002). *Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey*. International Journal of Production Research vol. 40(3): 745–760. Disponible en [fecha de acceso 05.11.2016] <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207540110091712>
1336. Quesnel, G.; Ramat, E.; Duboz, R. y Mamadou K. (2007). *VLE: a multimodeling and simulation environment*. Conference: Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference (SCSC 2007), 16-19 de julio de 2007, San Diego (California, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 05.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/221112915_VLE_a_multimodeling_and_simulation_environment.
1337. Raa, B.; Dullaert, W. y Van Schaeren, R. (2011). *An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem*”, Expert Systems with Applications, vol. 38 (11): 14136- 14147. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.04.224. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220214664_An_enriched_model_for_the_integrated_berth_allocation_and_quay_crane_assignment_problem
1338. Racero, J.; Eguía, I. y Canca J.D. (2013). Simulación de eventos discretos. Grupo de Tecnologías de la información e Ingeniería de Organización. Departamento de organización industrial y Gestión de empresas. Disponible en [fecha de acceso 25-12-2013] http://italica.us.es/asignaturas/Simulacion/PROBLEMAS_DE_SIMULACION_ALU.PDF.
1339. Radmilović, Z. (1992). *Ship-berth link as bulk queuing system in ports*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 118(5): 474-495. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1992\)118:5\(474\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:5(474))
1340. Radmilović, Z.; Čolić, V. y Hrle, Z. (1996). *Some Aspects of Storage and Bulk Queueing Systems in Transport Operation*. Transportation Planning and Technology, vol. 20(1): 67-81. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: 10.1080/03081069608717580
1341. Radmilović, Z.; Hrle, Z. y Muškatirović, J.V. (2003). *Power unit - cargo space link in inland waterway navigation*. Journal of Advanced Transportation, vol. 37(1): 129-138. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] DOI: 10.1002/atr.5670370106
1342. Radmilović, Z.; Dragović, B. y Maraš, V. (2005a). *Power unit – cargo space link in transport*. Yugoslav Journal of Operations Research, vol. 15(1): 49-52. Disponible en

- [fecha de acceso 05.05.2017] <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-0243/2005/0354-02430501049R.pdf>
1343. Radmilović, Z.; Dragović, B. y Meštrović, R., (2005b). *Optimal number and capacity of servers in $M X=a^{-}/M/c(\infty)$ queueing systems*. International Journal of Informatics and Management Sciences, vol. 16(3): 1-17. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 05.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/265318381_Optimal_number_and_capacity_of_servers_in_M_Xa_Mc_queueing_systems
 1344. Radmilović, Z.; Maras, V. y Jovanovic, S. (2007) *Ship Lock as General Queueing System with Batch Arrivals and Batch Service*. Promet - Traffic - Traffico 19(6): 343-352. Disponible en [fecha de acceso 10.06.2017] DOI: 10.7307/ptt.v19i6.969
 1345. Raffo, E. (1999). *Software de simulación*. Industrial Data, vol. 2(1): 57-60. Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016]
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/Vol2_n1/pdf/software.pdf.
 1346. Raiffa, H. y Schlaifer, R. (1961). *Applied statistical decision theory*. Harvard Business School, Boston, (Massachusetts, Estados Unidos), pp: 88-92. (Publicado el 15 de Mayo de 2000 por H. Raiffa y R. Schlaifer en “*Applied statistical decision theory*”, Wiley-Interscience; 1st edition (356 pages). ISBN-10: 047138349X y ISBN-13: 978-0471383499.
 1347. Rakke, J.G.; Stålhane, M.; Moe, C.R. y Norstad, L.I. (2011). *A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program*. Transportation Research Part C - Emerging Technologies, vol- 19(5): 896-911. DOI: 10.1016/j.trc.2010.09.006 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 22.11.2016]
https://www.researchgate.net/publication/251630804_A_rolling_horizon_heuristic_for_creating_a_liquefied_natural_gas_annual_delivery_program
 1348. Ramani, K. V. (1996). *An Interactive Simulation Model for the Logistics Planning of Container Operations in Seaports*. Simulation, vol. 66(5): 291-300. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016]
<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003754979606600503>
 1349. Rana, K. y Vickson, R. (1991). *Routing container ships using lagrangean relaxation and decomposition*. Transportation Science, vol. 25(3): 201-214. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 24.10.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/242933276_Routing_Container_Ships_Using_Lagrangean_Relaxation_and_Decomposition
1350. Rand, W.M. y Rust, R.T. (2011). *Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor*. International Journal of Research in Marketing, vol. 28(3): 181–193. Disponible bajo en [fecha de acceso 24.10.2016] https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1818543
 1351. Randers, J., y GölReino Unidoe, U. (2007). *Forecasting Turning Points in Shipping Freight Rates: Lessons from 30 Years of Practical Effort*. System Dynamics Review, vol. 23(2-3): 253-284. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sdr.376/abstract>
 1352. Rashidi, H. y Tsang, E. P. (2013). *Novel Constrains Satisfaction Models for Optimization Problems in Container Terminals*. Applied Mathematical Modelling, vol. 37(6): 3601-3634. Disponible en [fecha de acceso 29.01.2017] <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.042>
 1353. Ratcliff, M.S.W y Bischoff, E.E. *Allowing for weight considerations in container loading*. OR Spektrum, vol. 20(1): 65-71. Disponible en [fecha de acceso 29.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1007/BF01545534>
 1354. Rebollo, M.; Julian, V., Carrascosa, C. y Botti, V. (2000). *A Multi-Agent System for the Automation of a Port Container Terminal*. Proceeding of the 4th Autonomous Agents 2000 Workshop on Agents in Industry. 3-7 de Junio de 2000, Barcelona (España). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://users.dsic.upv.es/~vinglada/download/agentw.pdf>
 1355. Reddaa, Y.; El-Abeda, A.; Regterschot, J. y Scholten W. (2012). *LNG Supply Chain Design and Optimization at Qatargas: A showcase of industry-leading collaboration*. Proceedings of the 2012 World Gas Conference, Kuala Lumpur (Malasia). Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2012/wgc-2012-proceedings/speaker-presentations/committee-session/thursday/ef9-b-pgdc-new-lng-market-development/lng-supply-chain-design-and-optimisation-at-qatargas-2013-a-showcase-of-industry-leading-collaboration>
 1356. Reddy, P.C.P.; Karimi I.A. y Srinivasan, R. (2004a). *A Novel solution approach for optimizing crude oil operations*. Journal of the American Institute of Chemical Engineers (AIChE), vol. 50(6): 1177-1197. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1002/aic.1011](https://doi.org/10.1002/aic.1011)

-
1357. Reeves, C. (1993). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Scientific Publications. John Wiley & Sons, Inc. New York, (Estados Unidos) ©1993. 320 páginas ISBN:0-470-22079-1.
1358. Reilley, E.D. (2003). *Milestones in Computer Science and Information Technology*. Greenwood Press, Westport (Connecticut, Estados Unidos). 380 Páginas. ISBN 1-57356-521-0.
1359. Reitman, J. (1971). *Computer simulation applications*. New York: Wiley Interscience. 422 páginas. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] DOI: [10.1002/spe.4380040413](https://doi.org/10.1002/spe.4380040413)
1360. Remus, W. y O'Connor, M. (2001). *Neural network models for time series forecasting*. Capítulo en “*Principles of Forecasting: A Handbook for reasearchers and Practicioners*” (Editado por J.S. Armstrong), Kluwer (Dordrecht, Holanda). 850 páginas, pp: 245–256. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.springer.com/us/book/9780792379300>
1361. Repast (2016). *Repast*. Argonne National Laboratory, Illinois (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] http://repast.sourceforge.net/repast_simphony.php
1362. Repast (2017a). *Repast. We would like to hear from you!*. Argonne National Laboratory, Illinois (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 13.01.2017] <https://repast.github.io/papers.html>
1363. Repast (2017b). *The repast suite*. Argonne National Laboratory, Illinois (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 13.01.2017] <https://repast.github.io/>
1364. Resende, M.G.C y Ribeiro, C.C. (2003). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Handbook of Metaheuristics* (Editado por F. Glover y G. Kochenberger) Kluwer Academic Publishers, pp: 219-249. eBook ISBN 978-0-306-48056-0. (557 páginas). Disponible en [fecha de acceso 13.01.2017] DOI: [10.1007/b101874](https://doi.org/10.1007/b101874)
1365. Resnick (1996). *StarLogo: An Environment for Decentralized Modeling and Decentralized Thinking*. MIT Media Laboratory, Cambridge, Massachusets (Estados Unidos). *Proceedings of the CHI '96 Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*, 13 – 18 de abril de 1996, Vancouver, (British Columbia, Canadá) pp: 11-12 Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]. http://www.sigchi.org/chi96/proceedings/demos/Resnick/mjr_txt.htm

1366. Reveliotis, S. A. (2000). *Conflict resolution in AGV systems*. IIE Transactions vol. 32(7): 647–659. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]. DOI: 10.1023/A:1007663100796
1367. Revetria R.; F. Oliva y M. Mosca (2008). *Modelling of Voltri Terminal Europe in Genoa Using System Dynamic Model Simulation*. Proceedings of the 7th World Scientific and Engineering Academy Sociaty (WSEAS) International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSE '08), 21-23 de noviembre de 2008, Venecia (Italia). Disponible en [fecha de acceso 26.02.2017] <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2008/venice/icosse/icosse67.pdf>
1368. Ribeiro, G.; Mauri, G.; Beluco, S.C. y Laporte, G. (2016). *Berth Allocation in an Ore Terminal with Demurrage, Despatch and Maintenance*. Computers & Industrial Engineering, vol. 96(C): 8-15. DOI: 10.1016/j.cie.2016.03.005. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/297891090_Berth_Allocation_in_an_Ore_Terminal_with_Demurrage_Despatch_and_Maintenance
1369. Rice, S.V.; A. Marjanski, Markowitz, H.M. y Bailey, S.M. (2005). *The SIMSCRIPT III programming lenguaje for modular onject- oriented simulation*. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference (editado por M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.) pp: 621-630. Disponible en [fecha de acceso 22/01/2017] http://www.simscrip.com/docs/SIMSCRIPT_III_Paper_Win_Sim.pdf
1370. Richardson, G.P. y Pugh, A.L.-III (1981). *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*. Portland OR: Productivity Press. 424 Páginas. ISBN-10: 1883823439. ISBN-13: 978-1883823436.
1371. Rida M.; Mouncif, H. y Boulmakoul, A. (2011). *Application of Markov decision processes for modeling and optimization of decision-making within a container port*. Soft Computing in Industrial Applications, vol. 96 (2011): 349–358. doi:10.1007/978-3-642. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-20505-7_31
1372. Rida, M. (2014). *Modeling and Optimization of Decision-Making Process During Loading and Unloading Operations at Container Port*. Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 39(11): 8395–8408. (DOI: 10.1007/s13369-014-1328-8). Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <http://paperity.org/p/36739669/modeling-and-optimization-of-decision-making-process-during-loading-and-unloading>
1373. Ridolfi, A.; Allotta, B.; Costanzi, R. y Pugi, L. (2014). *Fast Prototyping of a Scaled AGV for the Testing of Stability Control for Industrial Vehicles*. Proceedings of the 6th

- European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC 2014), 11-12 de septiembre de 2014, Milán (Italia), pp: 202-206. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: 10.1109/EDERC.2014.6924388
1374. Rizzoli, A.; Gambardella, L.M. y Bontempi, G. (1997). *Simulation of an Intermodal Container Terminal to Assist the Management in the Decision Making Process*. Proceedings of 9th International Congress on Modeling and Simulation, Hobart, Tasmania. Páginas: 1508-1512. Disponible en [fecha de acceso 27.09.2016] https://www.researchgate.net/publication/200058815_Simulation_of_an_intermodal_container_terminal_to_assist_the_management_in_the_decision_making_process
1375. Rizzoli, A. E.; Fornara, N. y Gambardella, L. M. (1999a). *A simulation tool for combined rail-road transport in intermodal terminals*. Proceedings of the conference MODSIM 1999, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand (1999). 6 páginas Disponible en [fecha de acceso 27.09.2016] <http://people.idsia.ch/~luca/modsim99.pdf>
1376. Rizzoli, A. E.; Gambardella, L. M.; Zaffalon, M. y Mastrolilli, M. (1999b): *Simulation for the evaluation of optimised operations policies in a container terminal*. HMS99, Maritime & Industrial Logistics Modelling and Simulation, 16-18 de septiembre de 1999, Génova (Italia). 6 páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.09.2016] en <http://www.idsia.ch/~luca/hms99.pdf>
1377. Rizzoli, A.; Fornara, N. y Gambardella, L. (2002). *A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals*” Mathematics and Computers in Simulation vol. 59(1-3): 57-71. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(01\)00393-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(01)00393-7). Disponible en [fecha de acceso 27.01.2017]. <http://people.idsia.ch/~luca/matcom02.pdf>
1378. Rizzoli, A. (2009). *A collection of modelling and simulation resources on the internet*. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 24.11.2016] <http://people.idsia.ch/~andrea/sim/simtools.html>.
1379. Roach, P.A. y Wilson I.D. (2002). *A genetic algorithm approach to strategic stowage planning for container-ships*. Working paper, University of Glamorgan, (Sur de Galés, Reino Unido).
1380. Robenek, T.; Umang, N. y Bierlaire, M. (2012): *Integrated Berth Allocation and Yard Assignment in Bulk Ports using Column Generation*. Ecole Polytechnique Federale Lausanne (Lausanne, Suiza). Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] http://www.strc.ch/conferences/2012/Robenek_Umang_Bierlaire.pdf

-
1381. Rockwell (2016). *ARENA v15 Features*. Rockwell Automation© ARENA Simulation Software. [Fecha de acceso 25.06.2017]. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://info.arenasimulation.com/v15-features-release>
1382. Rodríguez, F. (1985). *Dirección y Explotación de Puertos*. Imprenta Industrial S.A. Bilbao (España). Patrocinado por el Puerto Autónomo de Bilbao) (Bilbao, España). ISBN 84.505-2633-7. 488 páginas.
1383. Rodríguez, L. E. y Rubén-Quesada, C. M. (2009). *La simulación computarizada como herramienta didáctica de amplias posibilidades*. Revista Cubana de Informática Médica vol. 1, Año 9 . Recurso en línea. ISSN:1684-1859. Disponible en [fecha de acceso 17.11.2016]. http://www.rcim.sld.cu/revista_18/articulos_html/simulacioncomputarizada.htm.
1384. Ronen, D. (1983). *Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems*. European Journal of Operational Research, Vol. 12(2): 119-126. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90215-1](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(83)90215-1)
1385. Ronen, D. (1986). Short-Term Scheduling of Vessels for Shipping Bulk or Semi-Bulk Commodities Originating in a Single Area. Operations Research, vol. 34(1): 164-173. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://dx.doi.org/10.1287/opre.34.1.164>
1386. Ronen, D. (2002). Marine inventory routing: shipments planning. Journal of the Operational Research Society, vol. 53(1): 108-114. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] [doi:10.1057/palgrave.jors.2601264](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601264).
1387. Roodbergen, K.J. y Vis, I.F.A. (2009). *A survey of literature on automated storage and retrieval systems*. European Journal of Operational Research, vol. 194(2): 343–362. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://www.roodbergen.com/publications/EJOR2009.pdf>
1388. Røsæg, E. (con la colaboración de Hovden, T. y Willumsen, T.) (2009). *A system for queuing in ports*. Universidad de Oslo - Scandinavian Institute of Maritime Law Yearbook 2008. (Sjørettsfondet, Boruega) Editado por Pozdnakova. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1697404
1389. Ross, W.; Ulieru M. y Gorod, A. (2014). *A multiparadigm modelling and simulation approach for system of systems engineering: A Case Study*. 9th International Conference on System of Systems Engineering (SOSE), 2014, 9-13 de junio de 2014, Stamford Grand (Adelaide, Australia). 6 páginas. Disponible en [último acceso en 15/06/2015] en

<http://www.theimpactinstitute.org/Publications/A%20Multi-Paradigm%20M&S%20Approach%20for%20SoSE.pdf>.

1390. Rossetti, M. D. (2010). *Simulation Modeling with Arena*. Editorial John Wiley & Sons, Inc., 2010. 744 páginas. ISBN: 978-1-118-60791-6.
1391. Rother, M., y Shook, J. (1999). *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate MUDA*. The Lean Enterprise Institute, Brookline Mass. 102 Páginas. ISBN-10: 0966784308 / ISBN-13: 978-0966784305
1392. Rouwenhorst, B., Reuter, B., Stockrahm, V., Van Houtum, G.J., Mantel, R.J. y Zijm, W.H.M. (2000). *Warehouse design and control: framework and literature review*. European Journal of Operational Research, vol. 122(1): 515-533. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/222746389_Warehouse_design_and_control_Framework_and_literature_review
1393. Roy, D. y Bandyopadhyay, A. (2010). *Cargo unloading problem: a quantitative modelling for arriving at optimum strategy*. International Journal of Modelling in Operations Management, vol. 1(2): 125-136. Print ISSN: 2042-4094 Online ISSN: 2042-4108. Disponible en [fecha de acceso 26.11.2016] <https://doi.org/10.1504/IJMOM.2010.038145>
1394. Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S.S. y Malmberg, C.J. (2012). *Performance analysis and design trade-offs in warehouses with autonomous vehicle technology*. IIE Transactions, vol. 44(12): 1045-1060. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0740817X.2012.665201>
1395. Russell, E.C. (1989). *Building Simulation Models with SIMSCRIPT II-5*. CACI Products Co. La Jolla, California (Estados Unidos).
1396. Russell, E.C. (1991): *SIMPSCRIPT II.5 and MODSIM II.5: A brief Introduction*. Proceedings of the 23rd Winter Simulation Conference – Año 1991. IEEE Computer Society, Washington DC (Estados Unidos). Editado por B. Nelson, W.D. Kelton y G.M. Clark. Páginas: 62-66. ISBN:0-7803-0181-1. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] http://informs-sim.org/wsc91papers/1991_0009.pdf.
1397. Rustell, M. (2014). *Optimising a breakwater layout using an iterative algorithm*. HR Wallingford y University of Surrey. Recurso en línea no publicado. Disponible en [fecha de acceso 30.09.2016]

- http://www.pianc.org/downloads/dwa/BREAKWATER%20LENGTH%20OPTIMISATION%20USING%20AN%20ITERATIVE%20ALGORITHM.%20M.Rustell_2014.pdf
1398. Saanen, Y. (2002). *The application of advanced simulations for the engineering of logistics control systems*. Building Blocks for Effective Telematics Application Developement and Evaluation. Editado por A. Verbraeck y A. Dahanayake, pp: 179–192. Delft University of Technology (Delft, Holanda).
1399. Saanen, Y. (2003). *The design and assessment of next generation automated container terminals*. Proceedings of 15th European Simulation Symposium (ESS'2003), 26–29 de Octubre de 2003, Delft (Holanda), pp:1-8. Editado por A. Verbraeck y V. Hlupic Disponible en [fecha de acceso 30.09.2016] https://www.tba.nl/resources/press+section/publications/2003_terminaldesign.pdf
1400. Saanen, Y. (2005). *Using emulation to improve the performance of your TOS*. Proceedings of the Automation in Port Operations Conference, 26–27 de Septiembre de 2005, Amsterdam (Holanda) y recogido en Port Technology International – Container Handling, pp: 77-80. Disponible en [fecha de acceso el 29.03.2017] https://www.tba.nl/resources/press+section/publications/using_emulationto_improve_the_performance_of_your_tos.pdf
1401. Saanen, Y. (2008). *Container terminal simulation software improves operating efficiency*. Freight International 2007. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] <https://www.copybook.com/companies/tba-bv/articles/playground-for-container-terminal-operations>
1402. Sabria F. y Daganzo C.F. (1989). *Approximate Expressions for Queueing Systems with Scheduled Arrivals and Established Service Order*. Transportation Science, vol. 23(3): 159-165. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: 10.1287/trsc.23.3.159
1403. Sacone, S. y Siri, S. (2009). *An integrated simulation-optimization framework for the operational planning of seaport container terminals*. Mathematical and Computer Modeling of Dynamical System, vol. 15(3): 275-293. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13873950902808636>
1404. Saeeda, N. y Larsenb, O.I. (2013). *Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines*. Case Studies on Transport Policy, vol. 4(2): 143–149. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2016.02.001>

-
1405. Sakasegawa, H. y Yamazaki, G. (1977). *Inaqualities and and approxsimation formula for the mean delay time in tandem queuing systems*. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, vol. 29(1): 445-466. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [doi:10.1007/BF02532805](https://doi.org/10.1007/BF02532805)
1406. Sammarra, C.; Cordeau, J.-F.; Laporte, G. y Monaco, M.F (2007). *A Tabu Search Heuristic for the Quay Crane Scheduling Problem*. Journal of Scheduling October 2007, vol. 10(4-5): 327-336. Disponible bajo petición en [feccha de último acceso el 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/225851071_A_tabu_search_heuristic_for_the_quay_crane_scheduling_problem
1407. Sánchez, C. y Sampedro, M. (1993). *Port Simulation Model. Coal Discharge and Delivery for a Thermal Power Plant in Lazaro Cardenas Port, Pacific Coast*. The 1993 Pritsker User Conference. Indianapolis, (Estados Unidos).
1408. Sánchez, C., Uribe, R. y Espinal J.C. (2005). *Port simulation model for the discharge and delivery of imported coal for a thermal power plant located in Lazaro Cardenas Port, Mexican Pacific Coast*. Proceedings of 2nd International Conference on Maritime Heritage and Modern Ports, Barcelona (España). (WIT Transactions on The Built Environment). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/79/14729>
1409. Sankaranarayanan, K. (2011). *Study on behavioral patterns in queuing: Agent based modeling and experimental approach*. PhD Dissertation, Facultad de Económicas, Institute of Management, Università della Svizzera Italiana (Universidad de Lugano, Italia). Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://doc.rero.ch/record/27284/files/2011ECO006.pdf>
1410. Santella, N., Steinberg, L. J., & Parks, K. (2009). *Decision Making for Extreme Events: Modeling Critical Infrastructure Interdependencies to Aid Mitigation and Response Planning*". Review of Policy Research, vol. 26(4): 409-422. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1541-1338.2009.00392.x/abstract>
1411. Saranen, J. y Hilmola, P.P. (2010). *Intermodal transportation in emergency situations in the Gulf of Finland*. Department of Industrial Engineering and Management. Kouvola Research Unit. Research Report 223 - Lappeenranta University of Technology. 172 páginas. ISBN 978-952-214-935-0; ISBN 978-952-214-936-7 (pdf); ISSN 1459-3173)

- Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] en http://www.stoca-simulation.fi/files/download/Research_Report_223.pdf
1412. Sarker, B.R. y Babu, P.S. (1995). *Travel time models in automated storage/retrieval systems: a critical review*. International Journal of Production Economics, vol. 40(1): 173-184. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00075-2](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00075-2)
1413. Sauri, S. y Martin, E. (2011). *Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 47(6): 1038-1057. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017]. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.04.005>
1414. Sauve, B. y Collinot, A. (1986). *An expert system for scheduling in a flexible manufacturing system*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 3(2): 229-233. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/0736-5845\(87\)90106-2](http://dx.doi.org/10.1016/0736-5845(87)90106-2)
1415. Saxena, S.K. (1996). *Object Oriented Simulation of Flexible Manufacturing System for comparison of Dispatching Rules*. Department of Industrial and Management Engineering. (Indian Institute of Technology Kanpur). Master Thesis. 117 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.195161>
1416. Sayareh, J. y Ahouei, V. R. (2013). *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Reducing the Delays of Cargo Handling Operations in Marine Bulk Terminals*. Journal of Maritime Research, vol. 10(2): 43-50. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/269370378_Failure_Mode_and_Effects_Analysis_FMEA_for_Reducing_the_Delays_of_Cargo_Handling_Operations_in_Marine_Bulk_Terminals
1417. Schade, B. y Schade, W. (2005). *Evaluating Economic Feasibility and Technical Progress of Environmentally Sustainable Transport Scenarios by a Backcasting Approach with ESCOT*. Transport Reviews, vol. 25(6): 647-668. Disponible en [fecha de acceso el 11.11.2016] <http://depts.washington.edu/sce2003/Papers/168.pdf>
1418. Scheithauer, G. (1999). *LP-based bounds for the container and multi-container loading problem*. International Transactions in Operational Research, vol. 6(2): 199-213. Disponible en [fecha de acceso el 11.11.2016] [https://doi.org/10.1016/S0969-6016\(98\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0969-6016(98)00035-5)

-
1419. Schmidt, J. y Taylor R. (1970). *Simulation and analysis of industrial Systems*. Homewood IL: Irwin (series in quantitative analysis for business). ISBN-10: 3537878168. ISBN-13: 978-3537878168
1420. Schneidereit, G.; Vos, S.; Parra, A. y Steenken, D. (2003). *A general pickup and delivery problem for automated guided vehicles with multiloads: a case study*. Working paper, University of Hamburg (2003), Hamburgo (Alemania).
1421. Scholz-Reiter, B.; Windt, K.; Kolditz, J.; Böse, F.; Hildebrandt, T.; Philipp, T. y Höhns, H. (2006). *New Concepts of Modelling and Evaluating Autonomous Logistic Processes*. Manufacturing, Modelling, Management and Control; Elsevier, Oxford (Reino Unido) (Editado por G. Chryssolouris y D. Mourtzis). Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017]
<https://pdfs.semanticscholar.org/e755/17fabb1ca064c58f02c1dc1449039ec956fa.pdf>
1422. Schonfeld, P. y Sharafeldien O. (1985). *Optimal berth and crane combinations in container ports*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 111(6): 1060–1072. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 27.09.2016]
https://www.researchgate.net/publication/245292357_Optimal_Berth_and_Crane_Combinations_in_Containerports
1423. Schonfeld, P. y Sharafeldien, O. (1985). *Optimal berth and crane combinations in containerports*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 111(6): 1060-1072. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:6\(1060\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:6(1060))
1424. Schrady, G.K.S. y Vassian, R.B. (1996). *Predicting ship fuel consumption*. Technical Report. NPS-OR-96-007, Naval Postgraduate School, Monterey, (California, Estados Unidos).
1425. Schriber, T.J. (1974). *Simulation using GPSS*. New York: Wiley. ISBN 9780471763109. 534 Páginas.
1426. Schriber, T.J. (1995). *Perspectives on Simulation using GPSS*. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference (ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W.R.Ligegdon y D. Gpldsman), pp: 451- 456. Disponible en [fecha de acceso 12.06.2017]
https://www.researchgate.net/publication/221525487_Perspectives_on_simulation_using_GPSS
1427. Schriber, T.J.; Cox,S.; Henriksen, J.; Lorenz, P.; Reitman, J. y Ståhl, I. (2001). *GPSS Turns 40: Selected Perspectives*. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference,

- editado por B. Peters, J. Smith, D. Madeiros y M. Rohrer, pp: 565-576. Piscataway (New Jersey, Estados Unidos). © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <http://simulation.su/uploads/files/default/2001-schriber-lorenz-cox-reitman-henriksen-stahl.pdf>
1428. Schriber, T.J.; Banks, J.; Seila A.F.; Ståh, I. Law, A.M. y Born, R. (2003). *Simulation text books. Old and New (Panel)*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. Editado por S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, pp-: 1952-1963. Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017] <http://www.informs-sim.org/wsc03papers/253.pdf>
1429. Schroer, B.J. (20016). *Simulation as a Tool in Understanding the Concepts of Lean Manufacturing*. SIMULATION, vol. 80(3): 171-175. Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] [doi: 10.1177/0037549716666682](https://doi.org/10.1177/0037549716666682)
1430. Schut, M.C.; Kentrop, M.; Leenaarts, M.; Melis, M. y Miller, I. (2004). *Approach: decentralised rotation planning for container barges*. Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI 2004, 22-27 de Agosto de 2004, Valencia (España). Editado por R.L. Mántaras y L. Saitta, pp: 755–759. IOS Press (2004). Disponible en [fecha de acceso 26.06.2017] <http://www.frontiersinai.com/ecai/ecai2004/ecai04/pdf/p0755.pdf>
1431. Schwetman, H. D. (1986). *CSIM: A C-Based Process-Oriented Simulation Language*. Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference. Editado por J.R. Wilson, J.O. Henriksen y S.D. Roberts. Páginas: 387- 396. Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] http://www.informs-sim.org/wsc86papers/1986_0059.pdf
1432. Schwetman, H. D. (1988). *Using CSIM to model complex systems*. Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference. Editado por M. Abrams, P. Haigh y J. Comfort. Páginas: 246- 253. Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] http://informs-sim.org/wsc88papers/1988_0036.pdf
1433. Schwetman, H. D. (1990a). *Introduction to process-oriented simulation and CSIM*. Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference. Editado por O. Balci, R.P. Sadpwski y R.E. Nance. Páginas 154- 157. Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] http://www.informs-sim.org/wsc90papers/1990_0029.pdf.
1434. Schwetman, H. D. (1990b). *CSIM Reference Manual (Revision 14)*. Technical Report ACA-ST-257-87. Microelectronics and Computer Technology Corporation, Austin (Texas, Estados Unidos). Disponible en Proceedings de la 22nd conference on Winter

- simulation. Pages 154-157 y en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.56.6808&rep=rep1&type=pdf>
1435. Schwetman, H. D. (1990b). *CSIM Reference Manual (Revision 14)*. Technical Report ACA-ST-257-87. Microelectronics and Computer Technology Corporation, Austin (Texas, Estados Unidos). Disponible en Proceedings de la 22nd conference on Winter simulation. Pages 154-157 y en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.56.6808&rep=rep1&type=pdf>
1436. Schwetman, H. D. (1995). *Object – Oriented simulation modeling with C++/CSIM17*. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference. Editado por C. Alexopoulos, K. Kang, W.R. Lilegdon y D. Goldsman. Páginas 529-533. Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] http://www.informs-sim.org/wsc95papers/1995_0082.pdf.
1437. Schwetman, H. D. (1996). *CSIM18 – The simulation engine*. Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference. Editado por J.M. Charnes, D.J. Morrice, D.T. Brunner y J.J. Swain. Páginas 517-521. Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc96papers/073.pdf>.
1438. Schwetman, H. D. (2005). *Technical Note - Processes in CSIM for Java*. Mesquite Software Newsletter. Vol. 3 – Otoño 2005. Mesquite Software, Inc. (Austin, Texas) Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.mesquite.com/newsletter/newsletter-v3.php#technote>.
1439. Sciomachen, A. y Tanfani, E. (2007). *A 3d-bpp approach for optimising stowage plans and terminal productivity*. European Journal of Operational Research, vol. 183(3): 1433–1446. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.11.067>
1440. Schwetman, N. (2009). *CSIM: Products / FAQ*. Mesquite Software Newsletter, volumen 10 – verano 2009. Mesquite Software, Inc. (Austin, Texas) Disponibe en [fecha de acceso 18.11.2016] <http://www.mesquite.com/newsletter/>.
1441. Sculli, D. y Hui, C. F. (1988): *Three dimensional stacking of containers*. Omega. Vol. 16(6): 585–594. (1988). Disponible bajo petición en [fecha de acceso 18.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/23793512_Three_dimensional_stacking_of_containers

-
1442. Sebo, D. (1995). *A system dynamics approach to intermodalism at the Port of Lewiston*. Technical Report: INEL--96/0274. Idaho National Engineering Laboratory. Idaho (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 03.02.2017] <http://www.osti.gov/scitech/biblio/367249>.
1443. Segovia, R. (2009). *Simulación de sistemas para la optimización del almacenamiento y despacho de los productos de gas natural*. Ingeniería Industrial, núm. 27, 2009, pp: 81-98. ISSN 1025-9929. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428493006>
1444. Selwyn, B. (2008). *Bringing social relations back in (re)conceptualising the 'Bullwhip Effect' in global commodity chains*. International Journal of Management Concepts and Philosophy, vol. 3(2): 156-175. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IJMCP.2008.021272>.
1445. Sgouridis, S.P y Angelides, D.C. (2002). *CEPM 2: simulation-based analysis of handling inbound containers in a terminal*. Proceedings of the 34th conference on Winter simulation: Exploring new frontiers (2002). Editado por E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, y J. M. Charnes, pp: 1716-1724. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016]. <http://www.informs-sim.org/wsc02papers/235.pdf>
1446. Sgouridis, S.P., Makris, D. y Angelides, D.C. (2003). *Simulation analysis for midterm yard planning in container terminal*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 129(4): 178-187. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129:4\(178\)](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:4(178)).
1447. Sha, M. y Huang, X. (2010). *A system dynamics model for port operation based on time, quality and profit*. International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management, 2010, vol. 3. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/224136597_A_system_dynamics_model_for_port_operation_system_based_on_time_quality_and_profit.
1448. Shabayek, A.A. y Yeung, W.W. (2000). *A queuing model analysis of the performance of the Hong Kong container terminals*, Transportation Planning and Technology, vol. 23(4): 323-351. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03081060008717656>
1449. Shabayek, A. y Yeung, W. (2002). *A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong*. European Journal of Operational Research, vol. 140 (2002): 1–

11. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00216-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00216-8)
1450. Shah, N. (1996). *Mathematical programming techniques for crude oil scheduling*. Computers & Chemical Engineering, vol. 20(2): 1227-1232. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/246778113_Mathematical_Programming_Techniques_for_Crude_Oil_Scheduling
1451. Shahidi, R. (1988). *Mobile robot navigation using potential functions*. Master of Science Thesis, MS. 89-3. (Dirigida por M. Shayman y P.S. Krishnaprasad). Universidad de Maryland. Maryland (Estados Unidos). 71 páginas. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] <http://drum.lib.umd.edu/handle/1903/4950>
1452. Shahidi, R. (1991). *Mobile robot navigation using potential functions*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp: 2047-2053. 9-11 de abril de 1991, Sacramento (California, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: [10.1109/ROBOT.1991.131928](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1991.131928)
1453. Shannon, R. E. (1975). *Systems simulation: the art and science*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall. 368 Páginas. ISBN-10: 0138818398 / ISBN-13: 978-0138818395. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/44460843_Systems_simulation_the_art_and_science_Robert_E_Shannon
1454. Sharif, O.; Huynh, N.; Chowdhury, M. y Vidal, J.M. (2012). *An Agent-Based Solution Framework for Inter-Block Yard Crane Scheduling Problems*. International Journal of Transportation Science and Technology, vol. 1(2): 109-130. Disponible en [fecha de acceso 03.03.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043016301538>
1455. Shen, W.S. y Khoong, C.M. (1995). *A DSS for empty container distribution planning*. Decision Support Systems, vol. 15(1): 75-82. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/222477839_A_DSS_for_empty_container_distribution_planning
1456. Shen, W. y Norrie, D.H. (1999). *Agent-based systems for intelligent manufacturing: A state-of-the-art survey*. Knowledge and Information Systems, vol. 1(2): 129-156. Disponible en [fecha de acceso 03.03.2017] <http://link.springer.com/article/10.1007/BF03325096>

-
1457. Sherali, H.D.; Al-Yakoob, S.M. y Hassan, M.M. (1999). *Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem*. IIE transactions vol. 31(5): 395-406. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [doi:10.1023/A:1007502205917](https://doi.org/10.1023/A:1007502205917)
1458. Sherali, H.D. y Al-Yakoob, S.M. (2005). *Determining an optimal fleet mix and schedules. II: Multiple sources and destinations, and the option of leasing transshipment depots*. Integer Programming Theory and Practice (editado por John K. Karlof). CRC Press 2005, pp: 137-166. Print ISBN: 978-0-8493-1914-3. eBook ISBN: 978-1-4200-3959-7. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1201/9781420039597.ch6](https://doi.org/10.1201/9781420039597.ch6)
1459. Shi, X. y Voß, S. (2007). *Container terminal operations under the influence of shipping alliances*. Capítulo 9 en “*Risk Management in Port Operations, Logistics and Supply Chain Security*”, pp: 135 – 160. Editado por K. Bichou, M. Bell y A. Evans. Print ISBN: 9781843116554, eBook ISBN: 9781315850504. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://www.tandfebooks.com/action/showBook?doi=10.4324%2F9781315850504&>
1460. Shields, J.J. (1984). *Container Stowage: A computer aided preplanning system*. Marine Technology, vol. 21(4): 370-383. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/245782348_Containership_Stowage_A_Computer-Aided_Preplanning_System
1461. Shih, L.-H. (1997) *Planning of fuel coal imports using a mixed integer programming method*. International Journal of Production Economics, vol. 51(3): 243-249. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 15.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/4915725_Planning_of_fuel_coal_imports_using_a_mixed_integer_programming_method.
1462. Shingo, S. y Dillon, A.P. (1989): *A Study of the Toyota Production System: From an Industrial Engineering Viewpoint (Produce What Is Needed, When It's Needed)*. Productivity Press, Portland, Ore. (Octubre 1989). 296 Páginas. ISBN-10: 0915299178 / ISBN-13: 978-0915299171
1463. Shire, S. (2015). *Applied modelling algorithms for ports and terminals*. Port Technology, vol. 66 (2015). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] https://www.porttechnology.org/technical_papers/applied_modelling_algorithms_for_ports_and_terminals

-
1464. Shoham Y. y Leyton-Brown. K. (2008). *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 496 páginas, ISBN 978-0-521-89943-7.
1465. Siddiqui, A.W. y Verma, M. (2013). *An Expected Consequence Approach to Route Choice in the Maritime Transportation of Crude Oil*. Risk Analysis, vol. 33(11): 2041-2055. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] DOI: [10.1111/risa.12049](https://doi.org/10.1111/risa.12049)
1466. Siddiqui, A.W. y Verma, M. (2015). *A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil*. Transportation Research Part D Transport and Environment, vol. 37(2015): 65-78. DOI: 10.1016/j.trd.2015.04.010. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/276413688_A_bi-objective_approach_to_routing_and_scheduling_maritime_transportation_of_crude_oil.
1467. Siebers, P.-O. y Aickelin, U. (2008). *Introduction to multiagent simulation*. Lecciones de la School of Computer Science & IT (ASAP). University of Nottingham. (Nottingham, Reino Unido). 25 páginas. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0803/0803.3905.pdf>
1468. Siebers, P.O.; Macal, C.M.; Garnett, J., Buxton, D. y Pidd, M. (2010). *Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation!*. Journal of Simulation vol. 4(2010): 204–210. doi:10.1057/jos.2010.14. Disponible en (fecha de acceso 22.10.2016) <http://www.palgrave-journals.com/jos/journal/v4/n3/full/jos201014a.html>
1469. Siemens (2017). *Plant Simulation*. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Plano (Texas, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.05.2017]. www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml
1470. Silberholz, M. B.; Golden, B. L. y Baker, E. K. (1991). *Using simulation to study the impact of work rules on productivity at marine container terminals*. Computers and Operations Research, vol. 18(5): 433 – 452. Disponible en [fecha de acceso 02.04.2017] [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(91\)90020-R](https://doi.org/10.1016/0305-0548(91)90020-R)
1471. Silva, V.M., Coelho, A.S., Novaes, A.G., & Lima, O.F.Jr. (2011). *Remarks on Collaborative Maritime Transportation's Problem Using System Dynamics and Agent Based Modeling and Simulation Approaches*. IFIP Advances in Information and Communication Technology y Working Conference on Virtual Enterprises PRO-VE 2011: Adaptation and Value Creating Collaborative Networks, vol. 1, pp: 245-252.

- Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016]
http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23330-2_27
1472. SIMIO (2010). *SIMIO Release Notes*. Simio LCC. Sewickley (Pittsburgh, Pensilvania, Estados Unidos). Recurso en línea. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.06.2017]
<http://www.simio.com/downloads/public/software/SimioReleaseNotes49.pdf>
1473. SIMIO (2016). *SIMIO: Port Simulation Software*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pensilvania, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016]
<http://www.simio.com/applications/port-simulation-software/>
1474. SIMIO (2017a). *SIMIO Forward Thinking*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pensilvania, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://www.simio.com>
1475. SIMIO (2017b). *SIMIO 7. SIMIO leads the way*. Simio LLC Sewickley (Pittsburgh Pensilvania, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 10.10.2017] https://www.simio.com/resources/release-notes/notes/version_7_summary.php
1476. SIMPSCRIPT (2016). *SIMPSCRIPT: Modelling and Simulation Tools*. CACI Advanced Simulation Laboratory. San Diego (California, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://www.simscrip.com/>
1477. Simpson, J. y Dagli, C. (2008). *System of Systems: power and paradox*. Proceedings of the IEEE International Conference on System of Systems Engineering, Junio 2008, pp: 1-5. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/224362612_System_of_systems_Power_and_paradox
1478. SIMULART (2013). *SIMULART: Simulación de Puertos Comerciales*. Promodel-Simulart. Providencia. Santiago – Chile. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://www.simulart.cl/industrias/puertos-comerciales/>
1479. Sinha-Ray, P., J. Carter, T. Field, J. Marshall, J. Polak, K. Schumacher, D. Song, J. Woods, y J. Zhang. (2003). *Container World: Global agent-based modelling of the container transport business*. Proceedings of the 4th Workshop on Agent-Based Simulation, Edited by M.-M. Seidel. SCS Europe BVBA. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www3.imperial.ac.Reino Unido/pls/portallive/docs/1/12836.PDF>

-
1480. Siroky, J. (2011). *Automatic transshipment systems for container transport in terminals*. Perner's Contacts, vol. 3(4): 145-154. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] http://pernerscontacts.upce.cz/22_2011/Siroky.pdf
1481. Skipworth, H. y Harrison, A. (2006). Implications of form postponement to manufacturing a customized product. *International Journal of Production Research*, vol. 44(8): 1627-1652. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540500362120>
1482. Sklenar, J. (1997). *Introduction to OOP in SIMULA*. Documento de trabajo no publicado. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] http://staff.um.edu.mt/jskl1/talk.html#History_67
1483. Slack, B. (1985). *Containerization, inter-port competition, and port selection*. *Maritime Policy & Management*, vol. 12(4): 293-303. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] DOI: [10.1080/03088838500000043](https://doi.org/10.1080/03088838500000043)
1484. Smith, W.L. (1953). *On the distribution queuing times*. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 49(03): 449-461. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] DOI: [10.1017/S0305004100028620](https://doi.org/10.1017/S0305004100028620)
1485. Smith, E.R. y Conrey, F.R. (2007). *Agent-based modeling: A new approach for theory building in social psychology*. *Personality and Social Psychology Review*, vol. 11(1): 87-104. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017]. <http://www.indiana.edu/~smithlab/pdfs/SmithConreyABM.pdf>
1486. SMS (2016). *Optimising Pit to Port Logistics: Designing a Mining Supply Chain with Confidence*. Simulation Modelling Servives PTY Ltd. Riverside Drive Mayfield West NSW 2304. New Castle (Australia). Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <https://www.arenasimulation.com/resources/SMS-case-study-mining-supply-chain-2016-08-23-print.pdf>.
1487. Song, K.T. y Tai, J.C. (1992). *Fuzzy navigation of a mobile robot*. *Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; 7-10 de Julio de 1992. Raleigh, (Carolina del Norte, Estados Unidos) pp: 621-627. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] doi: [10.1109/IROS.1992.587405](https://doi.org/10.1109/IROS.1992.587405)
1488. Song, L.; Cherrett, T. y Guan, W. (2011). *Study on berth planning problem in a container seaport: Using an integrated programming approach*. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62(1): 119-128. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.024>

1489. Song, J.-H. y Fuman, K.C. (2013). *A maritime inventory routing problem: Practical approach*. Computers & Operations Research, vol. 40(3): 657-665. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810002625>
1490. South Port (2017). *Container Terminal*. South Port NZ Ltd. Island Harbour, Bluff 9814, Nueva Zelanda. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <https://southport.co.nz/facilities-and-services/container-terminal>
1491. Speer U.; John, G. y Fischer, K. (2011). *Scheduling Yard Cranes Considering Crane Interference*. International Conference on Computational Logistics (ICCL'2011). Lecture Notes in Computer Science, vol. 6971, 2011, pp: 321-340. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] DOI: [10.1007/978-3-642-24264-9_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24264-9_24)
1492. Ståhl, I. (1992). *Animation with micro-GPSS and proof*. Volumen 6467 de Ekonomiska forskningsinstitutet vid Handelshögskolan i Stockholm - EFI. 12 páginas
1493. Ståhl, I. (2001). *GPSS – 40 years of Development*. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, editado por B. Peters, J. Smith, D. Madeiros y M. Rohrer, (pp 577-585). Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/3933170_GPSS-40_years_of_development
1494. Ståhl, I.; Henriksen, J. O.; Born, R. G. y Herper, H. (2011). *GPSS 50 yeras old, but still Young*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, and M. Fu, eds.). pp: 3952 – 3962. Disponible en [fecha de ítimo acceso 15/01/2017] <http://www.informs-sim.org/wsc11papers/351.pdf>.
1495. Stahlbock, R. y Voß, S. (2008). *Operations research at container terminals: a literature update*. OR Spectrum, vol. 30(1): 1–52. DOI 10.1007/s00291-007-0100-9. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/225323734_Operations_research_at_container_terminals_A_literature_update
1496. Stahlbock, R. y Voß, S. (2010). *Efficiency considerations for sequencing and scheduling of double-rail-mounted gantry cranes at maritime container terminals*. International Journal of Shipping and Transport Logistics, vol. 2(1): 95-123. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSTL.2010.029899>

-
1497. Standish, R.K. (1998). *Cellular Ecolab*. Complex Systems '98, pp: 1-14. Editado por Standish *et al.* Disponible en línea en High performance Computing Support Unit. University of New South Wales, Sidney (Australia). Disponible en [fecha de acceso 25.03.2017] https://www.researchgate.net/publication/2490765_Cellular_Ecolab
1498. Standish, R.K. (2000). *Ecolab 4*. Applied Complexity: From Neural Networks to Managed Landscapes. Editado por S. Halloy y T. Williams, T. New Zealand Institute for Crop and Food Research, (Christchurch, Nueva Zelanda), pp: 156-163. Disponible en [fecha de acceso 25.03.2017] <http://www.hpcoders.com.au/docs/ecolab4.pdf>
1499. Standish, R.K. y Leow, R. (2003). *EcoLab: Agent Based Modeling for C++ programmers*. Proceedings SwarmFest 2003, pp: 1-5 Disponible en [fecha de acceso 25.03.2017] <https://arxiv.org/pdf/cs/0401026.pdf>
1500. Standish, R.K. (2008). *Going Stupid with EcoLab*. Simulation, vol. 84(1): 611-618. Disponible en [fecha de acceso 25.03.2017] <https://arxiv.org/pdf/cs/0612014.pdf>
1501. Standridge, C.R. y Pritsker, A.A.B. (1987). *TESS: The Extended Simulation Support System*. Halsted Press, John Wiley & Sons, New York. 368 Páginas. ISBN-10: 0470208767 y ISBN-13: 978-0470208762
1502. Starbuck, W. (1983). *Computer simulation of human behavior*. Systems Simulation and Behavioral Science, vol. 28(2): 154-165. DOI: 10.1002/bs.3830280207 Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/227631355_Computer_simulation_of_human_behavior
1503. Stchedroff, N. y Cheng, R.C.H. (2003). *Modelling a continuous process with discrete simulation techniques and its application to LNG Supply chains*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (editado por: S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, y D. J. Morrice), pp: 1607-1611. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc03papers/204.pdf>
1504. Steenken, D. (1992). *Fahrwegoptimierung am Containerterminal unter Echtzeitbedingungen*. OR Spektrum vol. 14(3): 161-168. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] DOI: 10.1007/BF01783519
1505. Steenken, D.; Henning, A.; Freigang, S. y Vos, S. (1993). *Routing of straddle carriers at a container terminal with the special aspect of internal moves*. OR Spektrum, vol. 15(3): 167-172. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] DOI: 10.1007/BF02733716

1506. Steenken, D. (1999). *Latest operational experience with satellite based container positioning systems*. Proceedings of the Container Handling, Automation and Technology, IIR, London, (1999). Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://www.hhla.de/de/Presse/index.jsp> Steenken, D.; Winter, T. y Zimmermann, U.T. (2001). *Stowage and transport optimization in ship planning*. Grötschel M, Krumke S O, Rambau J (eds) Online optimization of large scale systems, pp: 731–745. Springer, Berlin. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-04331-8_35
1507. Steenken, D. (2003). *Optimised vehicle routing at a seaport container terminal*. Orbit, vol. 4(2003): 8-14.
1508. Steenken, D., Voß, S. y Stahlbock, R. (2004) *Container terminal operation and operations research - a classification and literature review*. OR Spectrum, vol. 26(1): 3-49. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/225493172_Container_terminal_operation_and_operations_research_-_A_classification_and_literature_review
1509. Steer, D.T. y Page A.C.C. (1961). *Feasibility and financial studies of a port installation*. Journal of Operational Research Society, vol. 12(3):145-160. Print ISN 0160-5682. DOI: 10.2307/3006772. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fjors.1961.27>
1510. Stone, H.S. (1972). *Introduction to computer organization and Data Structures*. MacGraw-Hill, Nueva York. 321 Páginas. ISBN:0070617260.
1511. Stroustrup, B. (2010). *C++ Programming Language- 3th Edition*. Publicado por Addison-Wesley Professional (11 de febrero de 2010). 1030 páginas. ISBN-10: 9780201700732 e ISBN-13: 978-0201700732.
1512. Stroustrup, B. (2013). *C++ Programming Language- 4th Edition*. Publicado por Addison-Wesley Professional (9 de mayo de 2013). 1368 páginas. ISBN - 13 978-0321563842 e ISBN-10: 0321563840.
1513. Stroustrup, B. (2014). *Programming: Principles and Practice Using C++ (2nd Edition)*. Publicado por Addison-Wesley Professional (25 de mayo de 2014). 1312 páginas. ISBN-10: 0321992784 e ISBN-13: 978-0321992789.
1514. Suban, D.T. y Twrdy, E. (2008). *Decision support for optimal repositioning of containers in a feeder system*. Promet Traffic & Trasportation, vol. 20(2): 71-77. Disponible en

- [fecha de acceso 05.05.2017]
<http://www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/viewFile/988/835>
1515. Sugeno, M. y Nishida, M. (1985). *Fuzzy control of model car*. Journal of Fuzzy Sets and Systems, vol. 16(2): 103-113. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] [doi>10.1016/S0165-0114\(85\)80011-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(85)80011-7).
1516. Sun, H.X. y Ren, Y.T. (2005). *The impact of forecasting methods on bullwhip effect in supply management effect*. Proceedings of the 2015 Engineering Management Conference, vol. 1(1): 215 a 219 Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://www-scf.usc.edu/~yingtaor/publications/BullwhipEffect.pdf>.
1517. Sun, Z.; Tan, K.C.; Lee, L.H. y Chew, E.P. (2013). *Design and evaluation of mega container configurations. An integrated simulation framework*. Simulation, vol. 89(6): 684-692. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0037549712475097?journalCode=simb>
1518. Süze, R.O. (2015). *Discrete Event Simulation Helps to Improve Terminal Productivity for New Design Container Ships*. Master Thesis West Pomeranian University of Technology, Szczecin y Federal University of Rio de Janeiro. Rio de Janeiro (Brasil) Dirigido por Prof. Ludmila Filina-Dawidowicz, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland y Prof. Jean-David Caprace, Federal University of Rio de Janeiro, Brasil. Disponible en [fecha de acceso 24.10.2016] http://www.oceanica.ufrj.br/labsen/arq_publicacoes/zWrIstStw.pdf.
1519. Swaminathan, J.M.; Smith, S.F. y Sadeh, N.M. (1998). *Modeling supply chain dynamics: A multiagent approach*. Decision Sciences, vol. 29(3): 607-632. Disponible en [fecha de acceso 13.03.2017] <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/user/sfs/www/papers/dsj04.pdf>
1520. Sweetser, A. (1999). *A comparison of System Dynamics (SD) and Discrete Event Simulation (DES)*. Proceedings of the 17th International Conference of the System Dynamics Society and 5th Australian & New Zealand Systems Conference (1999), 20-23 de julio de 1999, Welllinton (Australia). Disponible en [fecha de acceso 18.10.2016] <http://www.systemdynamics.org/conferences/1999/PAPERS/PARA78.PDF>
1521. Swinerd, C. (2014). *On the design of hybrid simulation models, focusing on the agent-based and system dynamics combination*. Phd Thesis. Supervisor: Dr KR McNaught. Cranfield University. Cranfield (Reino Unido). Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016] <http://ethos.bl.Reino Unido/OrderDetails.do?uin=Reino Unido.bl.ethos.613543>

-
1522. System Dynamics Society, (2016). *System Dynamics*. Universidad de Albany, SUNY Albany, NY 12222, New York (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016] <http://www.systemdynamics.org>
1523. Taboun, S.M. y Bhole, S.D. (1993). *A simulator for an automated warehousing system*. Computers & Industrial Engineering, vol. 24(2): 281-290. Disponible en [fecha de acceso 29.06.2017] [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(93\)90014-O](https://doi.org/10.1016/0360-8352(93)90014-O)
1524. Tahar, R.M. y Hussain, K. (2000). *Simulation and analysis for the Kelang Container Terminal operations*. Logistics Information Management, vol. 13(1): 14-20. (ISSN: 0957-6053). Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/235317807_Simulation_and_analysis_for_the_Kelang_Container_Terminal_operations
1525. Tako, A. y Robinson, S. (2006). *Towards An Empirical Comparison of Discrete-Event Simulation and System Dynamics in the Supply Chain Context*. Proceedings of the 2006 OR Society Simulation Workshop, 28-29 de Marzo de 2006, Ashorne Hill (Reino Unido). (Editado por S. Robinson, S. Taylor, S. Brailsford y J.Garnett). Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016] http://www.theorsociety.com/Pages/ImagesAndDocuments/Documents/Conferences/SW06/Sw06_18TakoRobinson.pdf
1526. Tako, A. y Robinson, S. (2009a). *Comparing discrete-event simulation and system dynamics: users perceptions*. The Journal of the Operational Research Society, vol. 60 (3): 296-312. (ISSN 0160-5682). Disponible en [fecha de acceso 29.11.2016] DOI: [10.1057/palgrave.jors.2602566](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602566)
1527. Tako, A., Robison S. y Ingalls, R.G. (2009). *Comparing model development in Discrete Event Simulation and System Dynamics*. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Páginas: 979-991. Disponible en [fecha de acceso 18.10.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc09papers/093.pdf>
1528. Tako, A. y Robinson, S. (2010). *Model development in discrete-event simulation and system dynamics: An empirical study of expert modellers*. European Journal of Operational Research, vol. 217(2-1): 784-794. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221710003668>
1529. Tako, A. y Robisson, S. (2011). *The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context*. Decision Support Systems, vol. 52(4): 802-815. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923611002211>.

-
1530. Takus, D.A. y Profozich, D. M. (1997). *Arena ® Software Tutorial*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Editado por S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, y B. L. Nelson. Páginas: 541-544 (1997). Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0541.PDF>.
1531. Taleb-Ibrahimi, M.; Castilho, B. y Daganzo, C. F. (1993). *Storage space vs handlingwork in container terminals*. Transportation Research-B 27B, vol. 27(1): 13–32. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(93\)90009-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(93)90009-Y)
1532. Tang, G.L.; Yu, X.H.; Wang, W.Y.; Guo, Z.J.; Song, X.Q. y Zhang, Y.H. (2015). *Simulation and Modelling of Roll-on/roll-off Terminal Operation*. International Conference of Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2015), vol. 1(1): 748-751. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] http://www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=22413
1533. Taniguchi, E.; Noritake, M.; Yamada, T. y Izumitani, T. (1999). *Optimal size and location planning of public logistics terminals*. Transportation research part E, vol. 35(3): 207-222. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(99\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(99)00009-5)
1534. Tavakkoli-Moghaddam, R.; Makui, A.; Salahi, S.; Bazzazi, M. y Taheri, F. (2009). *An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports*. Computers & Industrial Engineering, vol. 56(1): 241–248. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.05.011>
1535. Tavares de Azevedo, A; Ribeiro, C.M.; Sena, G.; Chaves, A.A.; Salles, L.L. y Moretti, A.C. (2012). *Solving the 3D Container Ship Loading Planning Problem by Representation by Rules and Beam Search*. Proceedings of the 1st International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES'12), 4-6 de febrero de 2012, Vilamoura (Algarve, Portugal), pp: 132-141. DOI: 10.5220/0003757801320141 Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/257356864_Solving_the_3D_container_ship_loading_planning_problem_by_representation_by_rules_and_beam_search
1536. Tavares de Azevedo, A.; Fernandes de Arruda, E.; Leduino de Salles, L.; Neto, Chaves, A.A. Moretti, A:C. (2013). *Solution of the 3D Stochastic Stowage Planning for Container Ships through Representation by Rules*. Proceedings of the 4th international workshop on Knowledge Discovery, Knowledge Management and Decision Support (Mazatlán, Mexico), pp: 120- 129. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017]

https://www.researchgate.net/publication/263843634_Solution_of_the_3D_Stochastic_Stowage_Planning_for_Container_Ships_through_Representation_by_Rules

1537. Tavares de Azevedo, A; Ribeiro, C.M.; Sena, G.; Chaves, A.A.; Salles, L.L. y Moretti, A.C (2014). *Solving the 3D Container Ship Loading Planning Problem by Representation by Rules and Meta-heuristics*. International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies vol. 6(3): 228-260. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/264823277_Solving_the_3D_container_ship_loading_planning_problem_by_representation_by_rules_and_meta-heuristics
1538. TBA (2017a). *TBA TIMESQUARE*. Delft TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/simulation/timesquare/>
1539. TBA (2017b). *TBA TRAFALQUAR*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/simulation/trafalquar/>
1540. TBA (2017c). *TBA TRAFALQUAR - Bulk*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/simulation/bulk/>
1541. TBA (2017d). *Gain Control over TOS implementation: TBA Controls TOS-testing*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/emulation/tos-testing/>
1542. TBA (2017e). *TBA Timeline*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/company-info/history/>
1543. TBA (2017f). *About TBA*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/company-info/history/>
1544. TBA (2017g). *Operational training focused on performance: TBA's Virtual Reality TOS*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/emulation/training/>
1545. TBA (2017h). *System approach to over 10% performance gain: TBA Controls TOS-tuning*. TBA - Technisch Bestuurskundig Adviesburo, Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tba.nl/en/emulation/tos-tuning/>

-
1546. Tecnomatix (2006). *eM-Plant - eMPower for manufacturing process management*. UGS Corporation. Torrance (California, Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 27.05.2017] https://www.plm.automation.siemens.com/en_gb/Images/fs_tx_eM_plant_tcm642-4943.pdf
1547. Tempelmeier, H. (2006). *Inventory Management in Supply Networks—Problems, Models, Solutions*. Norderstedt - Books on Demand 1st Edition. 312 Páginas. ISBN-10: 3833453737 y ISBN-13: 978-3833453731.
1548. Teo, Y. M. (1993). *PortSim: Simulation and animation of container port*. Proceedings of the 25th Annual Summer Computer Simulation Conference, julio de 1993, Boston (Estados Unidos), The Society for Computer Simulation International, pp: 143-147.
1549. Terno, J.; Scheithauer, G.; Sommerwei, U. y Riehme, J. (2000). *An Efficient Approach for the Multi-Pallet Loading Problem*. European Journal of Operational Research vol. 123(2): 372-381. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00263-5. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/4868638_An_Efficient_Approach_for_the_Multi-Pallet_Loading_Problem
1550. Tesfatsion, L. y Judd, K.L. (2006). *Handbook of Computational Economics, Volume II: Agent-Based Computational Economics*. Elsevier / North-Holland: Amsterdam (Holanda). 904 páginas. ISBN-10: 0444512535 e ISBN-13: 978-0444512536
1551. TGI (2017a). *OSCAR © Maritime Software*. TGI Maritime Software. Dunkerke (Francia). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tgims.com/oscar-en/>
1552. TGI (2017b). *CARROL © Maritime Software*. TGI Maritime Software. Dunkerke (Francia). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2017] <https://www.tgims.com/carrol-en/>
1553. Thiers, G. F. y Janssens, G. K. (1998). *A port simulation model as a permanent decision instrument*. SIMULATION 71(2): 117-25. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/220165147_A_Port_Simulation_Model_as_a_Permanent_Decision_Instrument
1554. Thurston, T. y Hu, H. (2002). *Distributed Agent Architecture for Port Automation*. Proceedings of the 26th International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2002), 26-29 de Agosto de 2002, Oxford (Reino Unido). Páginas: 81-90.

- Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <http://csee.essex.ac.Reino Unido/staff/hhu/Papers/IEEE-COMPSAC-2002-81-87.pdf>.
1555. Tian, Y.; Yang, B.; Fu, H. D. y Yu, J. Z. (2011). *Study on equipment scheduling of ZPMC automated container terminal based on improved PSO*. Applied Mechanics and Materials, vol. 143/144(2011): 879-884. Disponible en [fecha de acceso 22.02.2017] <https://www.scientific.net/AMM.143-144.879>
 1556. Tilove, R.B. (1990). *Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1: 566-571. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: [10.1109/ROBOT.1990.126041](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126041)
 1557. Tocher, K. D.y Owen, D. G. (1960). *The automatic programming of simulations*. Proceedings of the 2nd International Conference on Operational Research, 5-9 de septiembre de 1960, University of Aix-Marseille, Marsella (Francia) (Editado por J. Banbury y J. Maitland). The English Universities Press Ltd., Londres (Reino Unido). pp: 50–68.
 1558. Tocher, K.D. (1962). *The art of simulation*. English University Press. 184 páginas . ISBN 10: 0340114525.
 1559. Tomasgard, A.; Rømo, F.; Fodstad, M. y Midthun, K. (2007). *Optimization Models for the Natural Gas Value Chain*. Capítulo en “*Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization*”. Editado por Hasle, G., Lie, K.-A.y Quak, E. Springer Berlin Heidelberg. Páginas: 521-558. Disponible en [fecha de acceso 21.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/226331681_Optimization_Models_for_the_Natural_Gas_Value_Chain
 1560. TomasWeb (2016). *Tomasweb*. Universidad de Delft (Holanda). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016] <http://www.tomasweb.com/>
 1561. Tong, C. J.; Lau, H. C. y Lim, A. (1999). *Ant colony optimization for the ship berthing problems*. Proceedings of the 5th Asian Computing Science Conference – ASIAN’99 , 1012 de diciembre de 1999, Phuket (Tailandia). Incluido en Lecture Notes Advances in Computer Science, 1742: Berlin: Springer, pp: 359-370. ISBN:3-540-66856-X. Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016] https://archive.org/details/springer_10.1007-3-540-46674-6
 1562. Torgersson, O. (1996). *Note on Declarative Programming Paradigms and the Future of Definitional Programming* Department of Computing Science. Chalmers University of

- Technology and Göteborg University, Göteborg (Suecia). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.11.2016] <http://www.cse.chalmers.se/~olof/Papers/wm96.pdf>.
1563. Törnquist, J. y Davidsson, P. (2002). *Multi-Agent System approach to train delay handling*. Proceedings of Agent Technologies in Logistics & Workshop, the 15th European Conference on Artificial Intelligence, 21-26 de Julio de 2002, Lyon (Francia). ISBN: 978-1-58603-257-9. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:838067/FULLTEXT01.pdf>
1564. TOTAL SOFT BANK (2010). *O-cps. 2010*. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] http://www.tsb.co.kr/RBS/Fn/FreeForm/View.php?RBIIdx=Ver1_44
1565. Towill, D.R.; Naim, M.M. y Wikner, J. (1992). *Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains*. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, vol. 22(5): 3-13. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/09600039210016995>
1566. Tsai, Y.J.; Ai, C.; Wu, Y. y Siplon, P. (2010). *Simulating Port Logistic Operations using 3D visualization technology*. Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE'2010), 30 de junio – 2 de julio de 2010, Nottingham (Reino Unido). Nottingham University Press (editado por W. Tazani). Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] [http://www.engineering.nottingham.ac.uk/Reino Unido/icccbe/proceedings/pdf/pf24.pdf](http://www.engineering.nottingham.ac.uk/Reino%20Unido/icccbe/proceedings/pdf/pf24.pdf)
1567. Tsang, W.S. (2003). *Genetic algorithm for scheduling yard cranes in port container terminals*. Recurso no publicado. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]. https://www.researchgate.net/researcher/26892939_cengyunshi
1568. Tsinker, G.P. (2004). *Port Engineering: Planning, Construction, Maintenance, and Security*. Ed. Wiley; (1 edición – 16 Febrero 2004) (ISBN-10: 0471412740. ISBN-13: 978-0471412748). 896 páginas.
1569. Tuğcu, S. (1983). *A Simulation Study on the Determination of the Best Investment Plan for Istanbul Seaport*. The Journal of the Operational Research Society, vol. 34(6): 479-487. Disponible en [fecha de acceso 25.03.2016] <http://link.springer.com/article/10.1057/jors.1983.115>
1570. Turban, E. (1995). *Decision support and expert systems: management support systems*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall. 930 páginas. ISBN 0-02-421702-6.

-
1571. Türkoğulları, Y.B.; Taşkın, Z.C.; Necati Aras, N. y Kuban Altınel, İ. K. (2014). *Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals*. European Journal of Operational Research, vol. 235(1): 88–101. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.015>
1572. Uğurlu, O.; Yüksekildiz, E. y Kose, E. (2014). *Simulation Model on Determining of Port Capacity and Queue Size: A Case Study for BOTAS Ceyhan Marine Terminal*. Transnav: The International Journal of Marine Navigation and Safety of Sea Transport, vol. 8(1): 143-150. DOI: 10.12716/1001.08.01.16. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/270519563_Simulation_Model_on_Determining_of_Port_Capacity_and_Queue_Size_A_Case_Study_for_BOTAS_Ceyhan_Marine_Terminal
1573. Ulrich, K.; Straßburger, S. y Beikirch, J. (1998). *Distributed simulation with JavaGPSS based on the High Level Architecture*. Simulation Series 30. Páginas 85-90. Disponible en [fecha de acceso 22.11.2016] <http://www.strassburger-online.de/papers/WebSimJavaGPSS.pdf>
1574. Ulusçu, O.S.; Özbaz, B.; Altıok, T. y Or, I. (2009). *Risk analysis of the vessel traffic in the strait of Istanbul*. Risk Analysis, vol. 29(10): 1454-1472. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01287.x
1575. Ulusoy G. U.; Sivrikaya-S.; Erifoglu F. y Bilge, Ü. (1997). *A genetic algorithm approach to the simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles*. Computers & Operations Research vol. 24(4): 335–351. Disponible en [fecha de acceso 02.11.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054896000615>
1576. Umang, N.; Bierlaire, M. y Vacca, I. (2011). *The berth allocation problem in bulk ports*. Proceedings of the 11th Swiss Transport Research Conference (STCR'2011), 11-14 de mayo de 2011, Monte Verità (Ascona, Suiza). Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] https://infoscience.epfl.ch/record/167446/files/Nitish_STRC2011.pdf
1577. Umang, N.; Bierlaire, M. y Vacca, I. (2013). *Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 54(2013): 14-31. DOI: 10.1016/j.tre.2013.03.003. Disponible en [fecha de acceso 07.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/228533450_Exact_and_Heuristic_Methods_to_Solve_the_Berth_Allocation_Problem_in_Bulk_Ports

-
1578. UNCTAD (1969). *Development of Ports: Improvement of port operations and connected facilities*. Report N° TD/B/C4/421/Rev.1. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), New York (Estados Unidos), 1969, 310 páginas.
1579. UNCTAD (1973). *Berth Throughput: Systematic Methods for Improving General Cargo Operations*. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Naciones Unidas, Génova (Suiza), 1973, 193 páginas, pp:18-24.
1580. UNCTAD (1976). *Port Performance Indicators*. Report TD/B/C.4/131/Supp.1/rev.1. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Naciones Unidas, Génova (Suiza), 27 páginas. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/tdbc4d131sup1rev1_en.pdf
1581. UNCTAD (1979). *Port Development: a Handbook for Planners in Developing Countries*. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Naciones Unidas, Nueva York (Estados Unidos), 1979, 226 Páginas. ISBN-10: 011905602X; ISBN-13: 978-0119056020.
1582. UNCTAD (1985). *Port Development: a Handbook for Planners in Developing Countries* (2nd Edition). United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Naciones Unidas, Nueva York (Estados Unidos), 1985, 241 Páginas. ISBN-10: 9211121604; ISBN-13: 978-9211121605
1583. UNCTAD (1987) (ponencia de G. de Monie). *Measuring and evaluating port performance and productivity*. Monografía n° 6 sobre Gestión de Puertos. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Naciones Unidas, Ginebra (Suiza), 1987, 60 páginas. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017] http://unctad.org/en/Docs/ship4946_en.pdf
1584. UNCTAD (1988) (ponencia de G. de Monie). *Medición y Evaluación del rendimiento y productividad de los puertos*. Monografía n° 6 sobre Gestión de Puertos. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Naciones Unidas, Ginebra (Suiza), 1988, 60 páginas. Disponible en [fecha de acceso 05.06.2017]. http://unctad.org/es/Docs/ship4946_sp.pdf
1585. UNCTAD (2015). *Review of Maritime Transport*. UNCTAD/RMT/2015. United Nations Publications. Sales no. E. 15.II.D.6. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2015, Nueva York (Estados Unidos), 122 páginas. ISBN 978-92-1-112892-5. eISBN: 978-92-1-057410-5. ISSN 0566-7682. Disponible en [fecha de acceso 30.11.2016] http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015_en.pdf

1586. Ursavas, E. (2014). *A Decision Support System for quayside operations in a container terminal*. *Decision Support Systems*, vol. 59 (2014): 312-314. Editado por Elsevier. Disponible en [fecha de acceso 04.11.2016] <https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.01.003>
1587. USDD (1949). *Procedures for performing a failure mode effect and critical analysis*. United States Department of Defense (9 November 1949). MIL-P-1629. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <https://src.alionscience.com/pdf/MIL-STD-1629RevA.pdf>
1588. Vaca, C. (2011). *Paradigmas de programación*. Departamento de Informática. Universidad de Valladolid, Valladolid (España). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 01.05.2017] <http://www.infor.uva.es/~cvaca/asigs/docpar/intro.pdf>.
1589. Vacca, I.; Bierlaire, M. y Salani, M. (2007). *Optimization at container terminals: Status, trends and perspectives*. *Proceeding of the 7th Swiss Transport Research Conference (STCR'07)*, 12-14 de septiembre de 2007, Monte Verità, Ascona (Suiza). 21 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] http://www.strc.ch/conferences/2007/2007_vacca.pdf.
1590. Vacca, I.; Salani, M. y Bierlaire, M. (2010). *Optimization of operations in container terminals: hierarchical vs integrated approaches*. *Proceedings of the 10th Swiss Transport Research Conference (STCR'2010)*, 1-3 de septiembre de 2010, Ascona (Suiza). 16 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 7.11.2016] <http://www.strc.ch/conferences/2010/Vacca.pdf>
1591. Vacca, I.; Salani, M. y Bierlaire, M. (2013). *An Exact Algorithm for the Integrated Planning of Berth Allocation and Quay Crane Assignment*. *Journal Transportation Science*, vol. 47(2): 148-161. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 21.02.2017] https://www.researchgate.net/publication/262219991_An_Exact_Algorithm_for_the_Integrated_Planning_of_Berth_Allocation_and_Quay_Crane_Assignment
1592. van Asperen, E.; Dekker, R.; Polman, M. y De Swaan, H. (2003). *Modeling Ship Arrivals In Ports*. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, Nueva Orleans (Estados Unidos), vol. 2(1): 1737 – 1744. Editado por S. Chick, P.J. Sánchez, D. Ferrin y D.J. Morrice. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/4053670_Modeling_Ship_Arrivals_in_Ports
1593. Van Asperen, E.; Dekker, R. y Polman, M. (2011). *Priority allocation of ships in a port simulation Eelco*. *Proceedings of the 15th European Simulation Symposium*. (Editado por Alexander Verbraeck y Vlatka Hlupic), 26-29 de Octubre de 2011, Delft (Holanda). ISBN 3-936150-28-1 (book) / 3-936150-29-X (CD). Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017]

- <https://www.researchgate.net/publication/229003182> *Priority allocation of ships in a port simulation Eelco*
1594. van Dam, K.H.; Ottjes, J.A.; Lodewjks, G. y Wagennar, R.W. (2004). *Intelligent infrastructures: distributed intelligence in transport system control - an illustrative example*. Proceedings of the Systems, Man and Cybernetics, 2004, 10-13 de Octubre de 2004, La Haya (Holanda), vol. 5, pp: 4650-4654 Disponible en [fecha de acceso 21.03.2017] DOI: 10.1109/ICSMC.2004.1401265
1595. van Dam, K. H.; Adhitya, A.; Srinivasan, R. y Lukszo, Z. (2008). *Benchmarking numerical and agentbased models of an oil refinery supply chain*. Computer-Aided Chemical Engineering, vol. 25(2008): 623-628. Disponible en [fecha de acceso 21.03.2017] [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(08\)80109-5](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(08)80109-5)
1596. Van den Berg, J.P. y Gademann, A.J.R.M. (2000). *Simulation study of an automated storage/retrieval system*. International Journal of Production Research, vol. 38(6): 1339-1356. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <https://www.researchgate.net/publication/232976732> *Simulation study of an automated storageretrieval system*
1597. Van den Berg, J.P. (2002). *Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system*. International Journal of Production Economics, vol. 76(1): 13-25. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00149-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00149-9)
1598. van der Heijden, M.; Ebben, M.; Gademann, N. y, van Harten A. (2002). *Scheduling vehicles in automated transportation systems: algorithms and case study*. OR Spectrum, vol. 24(1): 31–58. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] DOI: 10.1007/s291-002-8199-x
1599. van Hee, K. y Wijbrands, R. (1998). *Decision support system for container terminal planning*. European Journal of Operational Research, vol. 34(3): 262–272. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90147-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90147-6)
1600. van Hemert, J. (1984). *Coal Receiving Terminals in Relation to Electricity Generation in Developing Countries*. Natural Resources Forum, vol. 8(1): 37-49. DOI: 10.1111/j.1477-8947.1984.tb00469.x. Disponible en [última fecha de acceso el 1410-2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-8947.1984.tb00469.x/references>
1601. van Schaeren, R.; Dullaert, W.; Raa, B.; Zampelli, S. y Vergados, Y. (2011). *Berth allocation and quay crane assignment using constraint programming*. Capítulo en

- “*Current Issues in Shipping, Ports and Logistics*”. Editado por T. Notteboom. Associatted Scientific Publishers. 608 Páginas. ISBN: 9789054878582. Presentado en Asian Logistics Round Table, 2-3 de marzo de 2010, Antwerp (Belgica). Disponible en [última fecha de acceso el 14.10.2016] <http://hdl.handle.net/1854/LU-2035007>
1602. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2011). *Dry bulk terminal characteristics*. Working Paper. Disponible en [última fecha de acceso el 14.10.2016] www.bulk-solids-handling.com/whitepaper/downloads/17205
1603. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2012a). *Modeling the arrival process at dry bulk terminals*. Power Point Presentation. Delft University of Technology - Faculty 3ME, Transport Engineering & Logistics. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 01.12.2016] <http://www.exspecta.nl/wp-content/uploads/2015/10/Modeling-arrival-process-at-dry-bulk-terminals.pdf>
1604. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2012b). *Stockyard dimensioning for dry bulk terminals*. Working Paper. TRAIL Research School, OCTubre 2012. Recurso en línea. 19 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 30.11.2016] http://rstrail.nl/new/wp-content/uploads/2014/12/vianen_van_2012.pdf
1605. van Vianen, T.A.; Mooijman, D.L.; Ottjes, J.A.; Negenborn, R.R. y G. Lodewijks (2012c). *Simulation based operational control of a dry bulk terminal*. Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2012), 11-14 de abril de 2012, Pekín (China). Páginas: 73-78. Disponible en [fecha de acceso 26.11.2016] <http://www.negenborn.net/pubs/2012-icnsc-vianen-et-al-tech.pdf>
1606. van Vianen, T. (2014): *Simulation-integrated Design of Dry Bulk Terminals*. Tesis Doctoral. Delft University of Technology (Marine & Transport Technology Department - Mechanical, Maritime and Materials Engineering Faculty). TRAIL Thesis Series T2015/1, the Netherlands TRAIL Research School. ISBN: 978-90-5584-182-0 . Copyright © 2015 by Teus van Vianen. 261 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 26.11.2016] http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:d707f257-307a-4fd0-9ee6-160f507a42a8/Simulation-integrated_Design_of_Dry_Bulk_Terminals.pdf
1607. van Vianen, T.; Ottjes, J.A.; Lodewijks, G. (2014a). *Simulation-based rescheduling of the stacker-reclaimer operation*. Working Paper. Posteriormente publicado en Journal of Computational Science 10(2015): 149-154. DOI: 10.1016/j.jocs.2014.06.004 Disponible en [fecha de acceso 30.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/263317677_Simulation-based_rescheduling_of_the_stacker-reclaimer_operation

-
1608. van Vianen, T.A.; Ottjes, J.A. y G. Lodewijks (2014b). *Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals*. Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 42(2014): 119-128. Disponible en [fecha de acceso 01.12.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X13001901>
1609. van Vianen, T.; Ottjes, J. y Lodewijks, G. (2015): *Belt conveyor network design using simulation*. Journal of Simulation, vol. 15(3): 1-9. DOI: 10.1057/jos.2014.38. Disponible en [fecha de acceso 26.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/273439910_Belt_conveyor_network_design_using_simulation.
1610. Van Zijderverld, E.J.A. (1995). *A structured terminal design method with focus on rain container terminal*. Tesis doctoral en Delft University (1995), Delft (Holanda). 277 Páginas. ISBN 90-370-0120-3. Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:842cf157-c54c-48c9-856b-cc6b3e585836?collection=research>
1611. Vanem, E.; Antao, P.; Ostvik, I. y de Comas, F.D.C. (2008a). *Analysing the risk of LNG carrier operations*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 93(9): 1328-1344. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: 10.1016/j.ress.2007.07.007
1612. Vanem, E.; Endresen, O. y Skjong, R. (2008b). *Cost-effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures*. Reliability Engineering & System Safety, vol. 93(9): 1354-1368. Disponible en [fecha de acceso 15.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.07.008>
1613. Vangheluwe, H.; Lara, J. y Mosterman, P. (2002). *An introduction to multiparadigm modeling and simulation*. Proceedings of the Artificial Intelligence and Simulation (AIS'2002), 7-10 de abril de 2002, Lisboa (Portugal), pp: 9–20. Disponible en [fecha de último acceso el 04.11.2016] <http://www.cs.mcgill.ca/~hv/publications/02.AIS.campam.pdf>.
1614. Vasili, M.R.; Tang, S.H. y Vasili, M. (2012). *Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies*. Capítulo 8 en “Warehousing in the Global Supply Chain”, pp: 159-209, Editado por R. Manzani, 486 Páginas. DOI 10.1007/978-1-4471-2274-6. Springer-Verlag London Limited. ISBN978-1-4471-2273-9. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://iauln.ac.ir/dorsapax/userfiles/Sub0/VasiliFPSpringerChapter8.pdf>

1615. Verschoof, I.J. (2002). *Cranes: Design, Practice, and Maintenance (2nd Edition)*. Univeridad de Michigan (Michigan, Estados Unidos). Editado por John Wiley & Sons Inc. ISBN: 978-1-86058-373-5. 328 Páginas.
1616. Versiant (2017). *Navis – TOS Support*. Versiant Corporation Charlotte, Carolina del Norte (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 29.03.2107] <http://www.versiant.com/marine-terminal-solutions/navis-tos-support>
1617. Vidal, J.M. y Huynh, N. (2010). *Building Agent-Based Model of Seaports Container Terminal*. Proceddings of 6th Workshop on Agents in Traffic and Transportation (Editado por Kluegl, Ossowski, Chaib-Draa y Bazzan), 10 páginas, 11 de Mayo de 2010, Toronto (Canadá). Disponible en [fecha de acceso 15.03.2017] <http://jmvidal.cse.sc.edu/papers/vidal10a.pdf>
1618. Videira, N.; Antunes, P.; Santos, R. y Gamito, S. (2003). *Participatory modelling in environmental decision-making: the Ria Formosa natural park case study*. Journal of Environmental Assessment Policy and Management, vol. 5(3): 421-447. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S1464333203001371>
1619. Videira, N.; Antunes, P. y Santos, R. (2009). *Scoping river basin issues with participatory modelling: the Baixo Guadiana experience*. Ecological Economics, vol. 68(4): 965–978. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.11.008>
1620. Videira, N.; Antunes, P.; Santos, R. y Lopes, R. (2010). *A participatory modelling approach to support integrated sustainability assessment processes*. Systems Research and Behavioral Science, vol. 27(4): 446–460. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sres.1041/full>
1621. Videira, N.; Lopes, R.; Antunes, P.; Santos, R. y Casanova, J.L. (2012). *Mapping Maritime Sustainability Issues with Stakeholder Groups*. Systems Research and Behavioural Science Systems Research, vol. 29(6): 596-619. Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sres.2141/abstract>
1622. Viera, V.; Gomez Santos, R.; Souza Costa, T. y Muniz Oliveira, A. (2012). *Greedy Heuristic for berth allocation in tidal bulk ports*. Jornada de Informática do Maranhão (JIM 2012) / Escola Regional de Computação dos Estados do Ceará, Maranhão e Piauí (ERCEMAPI 2012). 4-6 de septiembre de 2012, São Luís (Brasil). 5 Páginas. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 25.10.2016]

- https://www.researchgate.net/publication/230813519_Greedy_Heuristic_for_Berth_Allocation_in_Tidal_Bulk_Ports
1623. Vignaux, T. (2002). *SIMSCRIPT II.5® Simplified*. CACI Products Company. San Diego, California (Estados Unidos). 39 páginas. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 08.11.2016]] http://www.caciasl.com/cust_center/ss3docs/SimscriptSimplified.pdf
1624. Vilhelmsen, C.; Lusby, R.M. y Larsen, J. (2013). *Tramp ship routing and scheduling with integrated bunker optimization*. EURO Journal of Transportation and Logistics, vol. 3(2): 143-175. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] DOI: 10.1007/s13676-013-0039-8
1625. Villareal G.L.; De Giusti M.R. y Texier, J. (2012). *GPSS Interactive Learning Environment*. Proceedings of the III International Conference on New Horizons in Education (INTE'2012), 5-7 de Junio de 2012, Praga (República Checa). 10 Págnias. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/235970269_GPSS_interactive_learning_environment
1626. Villareal, G.L. (2013). *GPSS Interactive Learning Environment*. The Online Journal of new Horizons in Education, vol. 3(1): 32-39. ISSN 2146-7374. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/235970433_GPSS_interactive_learning_environment
1627. Vis, I.; de Koster, R.; Roodbergen, K.J. y Peeters L.W.P. (2001). *Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal*. Journal of The Operational Research Society - J 01/2001, vol. 52(4): 409-417. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fpalgrave.jors.2601094>
1628. Vis, I. F.A. y de Koster, R. (2003). *Transshipment of containers at a container terminal: An overview*. European Journal of Operational Research, vol. 147(1): 1-16. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222400376_Transshipment_of_containers_at_a_container_terminal_An_overview
1629. Vis, I.F.A.y Harika, I. (2004). *Comparison of vehicle types at an automated container terminal*. OR Spectrum, vol. 26(1): 117-143. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-003-0146-2>

-
1630. Vis, I.F.A.; de Koster, R. y Savelsbergh, M. (2005). *Minimum vehicle fleet size under time-window constraints at a container terminal*. Transportation Science, vol. 39(2): 249–260. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www2.isye.gatech.edu/~ms79/publications/terminal.PDF>
1631. Vis, I.F.A. (2006). *Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems*. European Journal of Operational Research, vol. 170(3): 677-709. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.020>
1632. Vis, I.F.A. y Carlo, H. J. (2010). *Sequencing two cooperating automated stacking cranes in a container terminal*. Transportation Science, vol. 44(2): 169-182. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0298>
1633. Vladimir, V.N. y Vapnik, V. (1995). *The nature of statistical learning theory*. Springer Science & Business Media, Nueva York (Estados Unidos). 314 páginas. ISBN 978-1-4419-3160-3 Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.springer.com/us/book/9780387987804>
1634. Volberg, O. (1939). *Problème de la queue statiosnaire et nostationnaire*. Docklady Akad. Nauk USSR, Vol. 24(1939): 657-661.
1635. von Altrock, C.; Krause, B. y Zimmermann, H.-J. (1992a). *Advanced Fuzzy logic control technologies in automotive applications*. Proceedings of the IEEE Conference on Fuzzy System, 8-12 Marzo 1992, San Diego (California, Estados Unidos), vol. 1(1): 835-842. (ISBN: 0-7803-0236-2). Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] DOI: [10.1109/FUZZY.1992.258767](https://doi.org/10.1109/FUZZY.1992.258767)
1636. von Altrock, C.; Krause, B. y Zimmermann, H.-J. (1992b). *Advanced fuzzy logic control of a model car in extreme situations*. Journal of Fuzzy Sets and Systems, vol. 48(1): 41-52. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] doi>[10.1016/0165-0114\(92\)90250-8](https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90250-8)
1637. Wadhwa, L. (1992). *Planning operations of bulk loading terminals by simulation*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers. (ASCE), vol. 18(3): 300-315. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-950X%281992%29118%3A3%28300%29>
1638. Wadhwa, L. (2000). *Optimizing deployment of ship loaders at bulk export terminal*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers. (ASCE), vol. 126(6): 297-304 DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:6(297) Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]

- <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-950X%282000%29126%3A6%28297%29>
1639. Wagner, H.F. (2014). *ContMAS*. Universidad de Duisburg-Essen (Essen, Alemania). © Copyright 2010-2014 Hanno - Felix Wagner. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] http://www-stud.uni-due.de/~sehawagn/contmas/page/index_en.html
1640. Wallace, A. (2001). *Application of AI to AGV control – agent control of AGVs*. International Journal of Production Research, vol. 39(4): 709–726. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1080/00207540010007310>
1641. Wang, F., y Lim, A. (2007). *A stochastic beam search for the berth allocation problem*. Decision Support Systems, vol. 42(4): 2186-2196. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <https://doi.org/10.1016/j.dss.2006.06.008>
1642. Wang, Z.-J.; Li, K. y Levy, J.K. (2008). *A heuristic for the container loading problem: A tertiary-tree-based dynamic space decomposition approach*. European Journal of Operational Research, vol. 191(1): 86-99. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/223434812_A_heuristic_for_the_container_loading_problem_A_tertiary-tree-based_dynamic_space_decomposition_approach
1643. Wang, Y. (2010). *Analysis Of Port Logistics Alliance System Based On System Dynamic*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.globethesis.com/?t=2189360275487279>
1644. Wang, X.; Wu, L. y Dong, M. (2011). *Modeling and Accomplishment of Loading-and-Unloading Equipment Optimum Allocation System at Bulk Terminal*. International Journal Computing Network Information Security, vol. 2011(3): 1-9. Disponible en [fecha de acceso 16.11.2016] <http://www.mecs-press.org/ijcnis/ijcnis-v3-n4/IJCNIS-V3-N4-1.pdf>
1645. Wang, Y.; Chou, C.-C. y Yeo, G.-T. (2013a). *Application and improvement of a System Dynamics model to forecast the volume of containers*. Journal of Applied Science and Engineering, vol. 16(2): 186-196. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/16-2/10-IE10011.pdf>
1646. Wang, Z.X.; Chan, F.T.S. y Chung, S.H. (2013b). *Storage allocation and Yard Trucks Scheduling in Container Terminals Using a Genetic Algorithm Approach*. 3rd International Conference on Intelligent Computational Systems (ICICS'2013) 29-30 de

- abril de 2013, Singapore (Singapore), pp:6-10 Disponible en [fecha de acceso 21.02.2017] <http://psrcentre.org/images/extraimages/2%20413525.pdf>
1647. Wang, W.L.; Liu, S.B.; Lo, S.M. y Gap, L.J. (2014). *Passenger Ship Evacuation Simulation and Validation by Experimental Data Sets*. Procedia Engineering, vol. 71(2014): 427-432. Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.061>
 1648. Wanhill, S.R.C. (1974a). *Further Analysis of Optimum Size Seaport*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. American Society of Civil Engineers. (ASCE), vol. 100(4): 377-383.
 1649. Wanhill, S.R.C. (1974b). *A study in port planning: The example of Mina Zayed*. Maritime Studies and Management, vol. 2(1): 48-55. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/03088837400000033>.
 1650. Wäscher, G.; Haußner, H. y Schumann, H. (2007). *An improved typology of cutting and packing*. problems. European Journal of Operational Research, vol. 183(3):1109-1130. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047>
 1651. Weaver, P. y Jordan, A. (2008). *What roles are there for sustainability assessment in the policy process?*. International Journal of Innovation and Sustainable Development, vol. 3(1-2): 9-32. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJISD.2008.018192>
 1652. Weaver, P. y Rotmans, J. (2006). *Integrated Sustainability Assessment: what is it, why do it, and how?*. International Journal of Innovation and Sustainable Development, vol. 1(4): 284-303 Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJISD.2006.013732?journalCode=ijisd>
 1653. Weeke H.P.M. y Ottjes, J.A. (2000). *Tomas: A tool for object-oriented Modelling and Simulation*. Proceedings of the Advanced Simulation Technology Conference (ASTC 2000) 19-20 de abril de 2000, Washington DC (Estados Unidos). Páginas: 76-81. The Society for Computers Simulation International (SCS). ISBN: 1-56555-199-0 Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] <http://www.tomasweb.com/publications/was0004b.pdf>
 1654. Weille, J. de (1968). *The optimum number of berths of a port*. International Bank for Reconstruction and Development. Economics Department Working Paper N° 19. 45

- Páginas. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]
<http://documents.worldbank.org/curated/en/988421468764704670/pdf/multi0page.pdf>
1655. Weille, J. de y Ray, A. (1974). *The optimum Port Capacity*. Journal of Transport Economics and Policy, vol. 8(3): 244 – 259. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017]
<http://www.jstor.org/stable/i20052373>
1656. Weiss, M.; Thomet, M. y Mostoufi, F. (1999). *Interactive simulation model for bulk shipping terminals*. Bulk Solids Handling, vol. 19(1): 95-98. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/292662011_Interactive_simulation_model_for_bulk_shipping_terminals
1657. Werner, A.; Uggen, K.T.; Fodstad, M., Lium, A.-G. y Egging, R. (2012). *Stochastic Mixed Integer Programming for Integrated Portfolio Planning in the LNG Supply Chain*. The Energy Journal, vol. 35 (1): 79-97. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.05.2017] https://www.researchgate.net/publication/268503433_Stochastic_Mixed-Integer_Programming_for_Integrated_Portfolio_Planning_in_the_LNG_Supply_Chain
1658. Wijnolst, N. (1975). *The Dynamics of National Fleet Development*. Dynamica, vol. 2(1): 3-10. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]
<http://www.systemdynamics.org/dynamica/articles/21/3.pdf>
1659. Wikipedia - ALG (2016). *Algoritmo*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo>
1660. Wikipedia - Analytica (2016). *Analytica (software)*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017]
[https://en.wikipedia.org/wiki/Analytica_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Analytica_(software))
1661. Wikipedia - CC (2016). *Concurrent Computing*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017]
https://en.wikipedia.org/wiki/Concurrent_computing.
1662. Wikipedia - DSL (2016). *Domain-specific language*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017]
https://es.wikipedia.org/wiki/Lenguaje_espec%C3%ADfico_del_dominio.
1663. Wikipedia - EVPI (2016). *Expected value of perfect information*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017]
https://en.wikipedia.org/wiki/Expected_value_of_perfect_information

-
1664. Wikipedia - IGU (2016). *Interfaz Gráfica de Usuario*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz_gr%C3%A1fica_de_usuario.
1665. Wikipedia - Java (2016). *Java (lenguaje de programación)*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Java_%28lenguaje_de_programaci%C3%B3n%29.
1666. Wikipedia - JOSS (2013). *JOSS: JOHNNIAC Open Shop System*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 22.06.2017] <https://es.wikipedia.org/wiki/JOSS>
1667. Wikipedia - OBO (2017). *Ore-bulk-oil carrier*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Ore-bulk-oil_carrier
1668. Wikipedia - PDE (2016). *Programación Dirigida a Eventos*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_dirigida_por_eventos.
1669. Wikipedia - PG (2016). *Programación Genérica*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_gen%C3%A9rica
1670. Wikipedia - POO (2016) *Programación Orientada a Objetos* Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_orientada_a_objetos.
1671. Wikipedia - POS (2016). *Port of Suzhou*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Port_of_Suzhou
1672. Wikipedia - PS (2017). *Plant Simulation*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Plant_Simulation#Historia_de_la_aplicaci.C3.B3n
1673. Wikipedia - RNE (2015). *Resolución numérica de ecuaciones no lineales*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Resoluci%C3%B3n_num%C3%A9rica_de_ecuaciones_no_lineales

-
1674. Wikipedia - RP (2016). *Reactive Programming*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Reactive_programming
1675. Wikipedia - SBR (2017). *Sistemas Basados en Reglas*. Wikipedia Foundation Inc. Disponible en [fecha de acceso 26.05.2017] https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_basado_en_reglas
1676. Wikipedia - Simula (2016). *Simula*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 15.06.2017] <https://es.wikipedia.org/wiki/Simula>
1677. Wikipedia - Software SD (2017). *List of system dynamics software*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] http://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_system_dynamics_software
1678. Wikipedia - Swarm (2017). *Swarm (Simulation)*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] [https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_\(simulation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_(simulation))
1679. Wikipedia - Swarm Development Group (2017). *Swarm Development Group*. Wikipedia®-Fundación Wikipedia, Inc. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] http://www.swarm.org/wiki/Swarm_Development_Group Wilensky, U. (1999). *NetLogo*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
1680. Wilensky, U. (1999). *NetLogo*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
1681. Wilensky, U. (2012): *NetLogo*. Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, Illinois (Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml>
1682. Wilensky, U. y Rand, W. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social and Engineered Complex Systems with NetLogo*. MIT Press: Cambridge, Massachusetts (Estados Unidos). ISBN-10: 0262731894 e ISBN-13: 978-0262731898. 504 Páginas.

1683. Wilson, I. D. y Roach, P. A. (1999). *Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning*. Journal of Heuristics, vol. 5(4): 403–418. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1009680305670>
1684. Wilson, I.D. y Roach, P.A. (2000). *Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions*. Journal of the Operational Research Society, vol. 51(11): 1248–1255. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] DOI: [10.1057/palgrave.jors.2601022](http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601022)
1685. Wilson, I.D.; Roach P.A. y Ware J.A. (2001). *Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study*. Knowledge-Based Systems, vol. 14(3–4): 137–145. Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-7051\(01\)00090-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-7051(01)00090-9)
1686. Wilson, J. y Goldsman D. (2001). *Alan Pritsker's multifaceted career: theory, practice, education, entrepreneurship, and service*. IIE Transactions vol. 33(2001): 139–147. Disponible en [fecha de acceso 25.01.2017] <http://www.ise.ncsu.edu/jwilson/files/pritsker-iiet-article.pdf>
1687. Wilson, J. (2011). *Philip J. Kiviat Papers 1962-2010 (bulk 1962-1972)*. Philip J. Kiviat Papers, MC 00429, Special Collections Research Center, North Carolina State University Libraries, Raleigh, NC. Accesible bajo petición en [fecha de acceso 22.06.2017] <http://www.lib.ncsu.edu/findingaids/mc00429/>
1688. Windt, K.; Böse, F. y Philipp, T. (2008). *Autonomy in Logistics - Identification, Characterisation and Application*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 24(4): 572–578. Disponible en [fecha de acceso 28.05.2017] <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.07.008>
1689. Winikoff, M.; Wagner, H.-F.; Young, T.; Cranefield, S.; Jarquin, R.; Li, G.; Martin, B. y Unlan, R. (2011). *Agent-Based Container Terminal Optimisation*. Proceedings of the 9th German Conference on Multi-Agent System Technologies (MATES 2011), Leipzig (Alemania), 6-7 de Octubre de 2011. Incluido en Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Editado por F. Klügl y S. Ossowski). 197 páginas. ISBN 978-3-642-24602-9. DOI 10.1007/978-3-642-24603-6. pp:137-148. Disponible en [fecha de acceso 25.04.2017] http://www-stud.uni-due.de/~sehawagn/contmas/file/abcto_mates.pdf
1690. Winter, T. y Zimmermann, U. (1998). *Discrete online and real-time optimization*. Proceedings of the 15th IFIP World Computer Congress: Fundamentals – foundations of computer science, Viena (Austria) y Budapest (Hungría), pp: 31–48

1691. Winter, T. (1999). *Online and real-time dispatching problems*. PhD Thesis. Beuth Hochschule für Technik Berlin (Beuth University of Applied Sciences Berlin), Berlin (Alemania). 251 Páginas- Disponible en [fecha de acceso 12.01.2017] https://www.researchgate.net/publication/2584118_Online_and_Real-Time_Dispatching_Problems
1692. Wittmann, T. (2008). *Agent-Based Models of Energy Investment Decisions*. Physica-Verlag Heidelberg. 113 páginas. ISBN 978-3-7908-2003-4 Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016]. <http://www.springer.com/br/book/9783790820034>
1693. Wolverine Software Corporation (s/f). *Comparison of SLX and GPSS/H for experienced GPSS/H Users*. Editado por Wolverine Software Corporation. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://www.wolverinesoftware.com/slxvsh.pdf.y>
1694. Wong, A. y Kozan E. (2010). *Optimization of container process at seaport terminals*. Journal of the Operational Research Society, vol. 61(4): 658–665. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://eprints.qut.edu.au/41788/1/41788.pdf>.
1695. Woo, S.-H.; Pettit, S.; Beresford, A. y Kwak D.-W. (2012). *Seaport Research: A Decadal Analysis of Trends and Themes Since the 1980s*. Transport Reviews 32(3): 1-27. DOI: 10.1080/01441647.2012.660996. Disponible en [fecha de acceso 07.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/254324477_Seaport_Research_A_Decadal_Analysis_of_Trends_and_Themes_Since_the_1980s
1696. Wood, B. y Tumay, K. (1999): *Modsim III and CACI's applications*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Editado por P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, y G. W. Evans. Páginas 234 – 238. Disponible en [fecha de acceso 03.11.2016] http://www.informs-sim.org/wsc99papers/032.PDF?origin=publication_detail.
1697. Wooldridge, J.M. (2002). *An Introduction to Multi Agent Systems*. John Wiley and Sons, Ltd. West Sussex (Inglaterra). ISBN-0-471-49691-X .365 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 25.10.2016] <http://coltech.vnu.edu.vn/http/media/courses/AI++/Tai%20lieu/TLTK.pdf>
1698. WorldCargo (2007). noticia en línea publicada en octubre 2007) *JADE multi-terminal TOS goes live*. World Cargo News. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] http://www.worldcargonews.com/secure/assets/nf20071123.146069_4746666512ab2.pdf

1699. WorldCargo (2014) (noticia en línea publicada en junio 2014) *Two more opt for Jade TOS*. World Cargo News. Disponible en [fecha de acceso el 05.10.2017] <http://www.worldcargonews.com/htm/n20140803.890263.htm>
1700. World Shipping Council (2017). *Top 50 World Container Ports*. World Shipping Council Partners in Trade. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso en 03.03.2017] <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/top-50-world-container-ports>
1701. WSC (2014). *The Winter Simulation Conference: The Premier Forum on Simulation Practice and Theory*. Winter Simulation Conference. Disponible en [fecha de última descarga 03.11.2016] <http://www.wintersim.org/2015/images/WSCHistory.pdf>
1702. Wu, K.-K.; Chen, C.-H., Ko, J.-M. y Lee, J.-D. (1999). *Path planning and prototype design of an AGV*. Mathematical and Computer Modelling, vol. 30(7-8): 147-167. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017] [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(99\)00171-5](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(99)00171-5)
1703. Wu, L.; Zhang, Y.; Wang, D. y Liu, Z. (2015). *Simulation Study of General Cargo Yard Layout*. Lecture Notes in Electrical Engineering vol. 337(1): 317-329. Disponible en [fecha de acceso 30.05.2017] DOI: 10.1007/978-3-662-46463-2_33
1704. Wurzer, G.; Kowarik, K. y Reschreiter, H. (2015). *Agent-Based Modeling and Simulation in Archaeology*. Springer: New York. 978 ISBN -3-319-00007-7. 269 Páginas. Disponible en [fecha de acceso 01.11.2016] <http://www.springer.com/cn/book/9783319000077>
1705. Wyman, F.P. (1970). *Simulation modeling: a guide to using SIMSCRIPT*. New York: Wiley (Wiley series in management and administration). 227 Páginas. ISBN10-0471968927, ISBN13-9780471968924.
1706. Xiao X.; Low M.Y.H.; Liu, F.; Huang, S.Y.; Hsu, W.J. y Li, Z. (2009). *An Efficient Block-Based Heuristic Method for Stowage Planning of Large Containerships with Crane Split Consideration*. Proceedings of the International Conference on Harbour, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, 23-25 de septiembre de 2009, Tenerife (España), pp: 93-99. Disponible en [fecha de acceso en 17.02.2017] <http://web.mysites.ntu.edu.sg/yhlow/public/Shared%20Documents/papers/hms09-stowage.pdf>
1707. Xiaodong, L.; Zhao, B.; Li, B. y Wang, N. (2010). *A System Dynamics Model of the Interaction between Port and City Based on the Green Concept*. Proceedings of the

- International Conference Logistic Engineering and Management (ICLEM 2010) - © American Society of Civil Engineers (ASCE). Editado por Curran Associates, Morehouse Lane Red Hook, Nueva York (Estados Unidos) pp: 684-691, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/41139\(387\)95](http://dx.doi.org/10.1061/41139(387)95). Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://toc.proceedings.com/09890webtoc.pdf>
1708. Xing S. (2012). *Research On The Regional Economic Contribution Of Port Of Tianjin* Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso el 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335455698>
1709. Xingyan Y.; Hua J., Wei L. y Hong L. (2009a). *Study on the navigation capacity of the approach channel of Tianjij Port - Part 1*. Port Technology International. Edición 33, pp: 45-47. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] <http://satcip.com/radmi/pdf/RaDMI-2009-Proceedings-Vol.1.pdf>
1710. Xingyan Y.; Hua J., Wei L. y Hong L. (2009b). *Study on the navigation capacity of the approach channel of Tianjij Port - Part 2*. Port Technology International. Edición 34, pp: 40-41. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] https://www.porttechnology.org/technical_papers/study_on_the_navigation_capacity_of_the_approach_channel_of_tianjin_port_pa
1711. Xue, Z.; Zhang, C.; Miao, L. y Lin W.-H. (2013). *An ant colony algorithm for yard truck scheduling and yard location assignment problems with precedence constraints*. Journal of Systems Science and Systems Engineering, vol. 22(1); pp 21-37. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] DOI: [10.1007/s11518-013-5210-0](https://doi.org/10.1007/s11518-013-5210-0)
1712. Yamada, T.; Frazila, R.B.; Yoshizawa, G. y Mori, K. (2003). *Optimising the handling capacity in a container terminal for investigating efficient handling systems*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 5(1): 597-608. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalip1984/19/0/19_0_683/pdf
1713. Yamada, Y. (2009). *The cost of oil spills from tankers in relation to weight of spilled oil*. Marine technology. Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) News, vol. 46(4): 219-228. Disponible en [fecha de acceso 22.04.2017] <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=12f74f0a-ac9f-47a3-babb-fb9a28c81c36>
1714. Yan, W.; Zhu, Y. y He, Y. (2014). *Performance evaluation of transport vehicle at automated container terminal using simulation*. International Journal of Hybrid

- Information Technology, vol. 7(2): 237-248. Disponible en [fecha de acceso 23.11.2016] http://www.sersc.org/journals/IJHIT/vol7_no2_2014/22.pdf
1715. Yang, C.; Choi, Y. y Ha, T. (2004). *Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals*. OR Spectrum, vol. 26 (149): 149–170. DOI: 10.1007/s00291-003-0151-5. Print ISN 0171-6468. Online ISN 1436-6304. Disponible en [fecha última consulta el 28.11.2016] <http://link.springer.com/article/10.1007/s00291-003-0151-5>
 1716. Yang, C. H.; Choi Y. S. y Ha T. Y. (2005). *Performance evaluation of transport vehicle at automated container terminal using simulation*. OR Spectrum. Container Terminals and Automated Transport Systems 2005, vol 26(2): 79-100.
 1717. Yang, J. H. y Kim, K. H. (2006). *A grouped storage method for minimizing relocations in block stacking systems*. Journal of Intelligent Manufacturing vol. 17(4): 453-463. Disponible en [fecha última consulta el 28.11.2016] DOI: 10.1007/s10845-005-0018-5
 1718. Yang, Y. (2007). *Study on the impact of port for regional economy based on System Dynamics Model*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2179360182972089>
 1719. Yang X.J. (2012). *Port Logistics Strategic Alliance Research*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189330335455484>
 1720. Yang, C.; Wang, X. y Li, Z. (2012). *An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal*. Computers & Industrial Engineering, vol. 63(1): 243–253. DOI: 10.1016/j.cie.2012.03.004 Disponible bajo petición en [fecha de acceso 28.11.2016] https://www.researchgate.net/publication/257177476_An_optimization_approach_for_coupling_problem_of_berth_allocation_and_quay_crane_assignment_in_container_terminal
 1721. Yang, P.; Sun, J. y Yue W. (2013). *A Novel Genetic Algorithm for Multiple Yard Cranes Scheduling*. Journal of Computational Information Systems, vol. 9(14): 5761-5769. Disponible en [fecha de acceso 15.10.2016] <http://www.Jofcis.com>
 1722. Yang, P., Miao, L., Xue, Z. y Qin, L. (2014). *Optimal storage rack design for a multi-deep compact AS/RS considering the acceleration/deceleration of the storage and retrieval machine*. International Journal of Production Research, vol. 53(3): 929-943.

- Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017]
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207543.2014.942441>
1723. Yaran, A. (2009). *Port area selection for Ro-Ro transportation in Marmara region and an application*. Master's thesis, Istanbul University, Estambul (Turquía).
1724. Yazdani, R.; Schmidt F.A., Merkuriev, Y. y Kamperman, F. (2005). *The Generic Animation and Simulation tool for Ports and Terminals*. International Journal of SIMULATION, vol. 6(7-8): 61-69. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017]
https://www.researchgate.net/publication/228876601_The_Generic_Animation_and_Simulation_Tool_for_Ports_and_Terminals.
1725. Yen, J. y Pfluger, N: (1995). *A fuzzy logic based extension to Payton and Rosenblatt's command fusion method for mobile navigation*. Transactions on Systems Man and Cybernetics, vol. 25(6): 971-978. Disponible en [fecha de acceso 04.05.2017]
https://www.researchgate.net/publication/3114561_Fuzzy_logic_based_extension_to_Payton_and_Rosenblatt's_command_fusion_method_for_mobile_robot_navigation
1726. Yeo, G.; J. Pak y Z. Yang (2013). *Analysis of dynamic effects on seaports adopting port security policy*. Transportation Research Part A, vol. 49(2013): 285–301. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856413000463>
1727. Yildirim, S. (2006). *Proposing a solution for choosing port layout problem in ro-ro transportation and applying it to Istanbul*. Master's thesis Yildiz Technical University, Estambul (Turquía).
1728. Yin, Y. -L. y Rau, H. (2006). *Dynamic selection of sequencing rules for a class-based unit-load automated storage and retrieval system*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 29 (11-12): 1259–1266. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] DOI: [10.1007/s00170-005-0005-1](https://doi.org/10.1007/s00170-005-0005-1)
1729. Yoshida, K.; Murayama, M. e Itakaki, T. (2002). *Study on evaluation of escape route in passenger ships by evacuation simulation and full-scale trials*. Research Institute of Marine Engineering of Japan. Recurso en línea. 12 páginas Disponible en [fecha de acceso 29.05.2017] <http://www.rime.jp/paper/interflame.pdf>
1730. Young, F.W. (1987). *Multidimensional scaling: History, theory, and applications*. Lawrence Erlbaum Associates. 336 Páginas ISBN 1135059888, 9781135059880.

1731. Yu, B.; C. Zhang; L. Kong; H.-L. Bao; W.-S. Wang; S. Ke y G. Ning (2014). *System dynamics modeling for the land transportation system in a port city*. Simulation, vol. 90(6): 706-716. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://sim.sagepub.com/content/early/2014/05/14/0037549714533619>.
1732. Yudhbir, L. y Iakovou, E. (2001). *A Maritime oil spill risk assessment model*. Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference (IOSC'2001), 26-29 de marzo de 2001, Tampa (Florida, Estados Unidos). Páginas: 235-240. Disponible en [fecha de acceso 01.06.2017] DOI: [10.7901/2169-3358-2001-1-235](https://doi.org/10.7901/2169-3358-2001-1-235)
1733. Yue, Y.; Chun, J. y Lin, H. (2006). *Optimal Planning on Gate System on Container Terminals Based on Simulation Optimization Method and Case Study*. 13th International Conference on Management Science and Engineering, 2006. (ICMSE '06), 5-7 de octubre de 2006, Lille (Francia). Páginas: 342 – 347. Harbin Institute of Technology Press. ISBN10 – 7560323553, ISBN13-9787560323558. Disponible en [fecha de acceso 28.11.2016] DOI: [10.1109/ICMSE.2006.313832](https://doi.org/10.1109/ICMSE.2006.313832)
1734. Yun, W.Y. y Choi, Y.S. (1999). *A simulation model for container-terminal operation analysis using an object oriented approach*. International Journal of Production Economics, vol. 59(1-3): 221-230. Disponible en [fecha de acceso 20.10.2016] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527398002138>
1735. Zaffalon, M. y Gambardella, L. M. (1998). *Optimization of resources in an intermodal terminal*. Technical Report IDSIA-20-98. Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale ©1998. Manno (Lugano, Suiza).
1736. Zampelli, S.; Vergados, Y.; Van Schaeren, R.; Dullaert, W. y Raa B. (2013). *The Berth allocation and quay crane assignment problem using a CP approach*. International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2013): Principles and Practice of Constraint Programming, Lecture Notes in Computer Science. 8124, 16-20 de septiembde de 2013, Uppsala (Suecia). Páginas: 880-896. Disponible en [fecha de acceso 29.01.2017] http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-40627-0_64
1737. Zeigler. B. (1976). *Theory of modeling y simulation*. New York: Wiley. ISBN 0-12-778455-1., Consultado en la reedición de Zeigler *et al.* (2000) 510 páginas. ISBN-10: 0127784551 y ISBN-13: 978-0127784557
1738. Zeigler, B.; Praehofer, H. y Kim, T. G. (2000). *Theory of Modelling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. Academic Press, Auflage 2ª edition. 510 páginas. ISBN-10: 0127784551 y ISBN-13: 978-0127784557.

1739. Zellner, M.L. (2008). *Embracing complexity and uncertainty: The potential of agent-based modeling for environmental planning and policy*. Planning Theory & Practice, vol. 9(4): 437–457. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1080/14649350802481470>
1740. Zeng, Q., y Z. Yang. (2009). *Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals*. Computers and Operation Research, vol. 36(6):1935-1944. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2008.06.010>
1741. Zeng, M.; Low, M.Y.H.; Jing, H.W.; Ying, H.S.; Liu, F y Aye W.C. (2010). *Improving Ship Stability in Automated Stowage Planning for Large Containerships*. Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientist (IMECS-2010) Volumen III. 17-19 de Marzo 2010, Hong Kong. 6 páginas. Disponible en [fecha de acceso 15.01.2017] http://www.iaeng.org/publication/IMECS2010/IMECS2010_pp1838-1843.pdf
1742. Zhan, Y.; Zhang, L., Li, W. y Yan, X. (2009a). *Research of Intelligent Decision of Vehicle Slot of Automobile Ro-Ro Terminal Yard*. Journal of Highway and Transportation Research and Development 2009-S1. Páginas: 23-29. ISSN: 1002-0268. Disponible en [fecha de acceso 20.05.2017] http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GLJK2009S1004.htm
1743. Zhan, Y.; Zhang, L., Li, W. y Gap. H.-y. (2009b): *Research on the Yard Operation in Automobile Ro-Ro Terminals*. Logistics Technology, vol. 2009(12): 5-6. Disponible en [fecha de acceso 20.05.2017] http://caod.oriprobe.com/articles/17687946/Research_on_the_Yard_Operation_in_Auto_mobile_Ro_Ro_Terminals.htm
1744. Zhang, C., (2000). *Resource planning in container storage yards*. Ph.D. Thesis, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong. 342 Páginas.
1745. Zhang, C.; Wan, Y.; Liu, J. y Linn, R.J. (2002). *Dynamic crane deployment in container storage yards*. Transportation Research-B, vol. 36(6): 537–555. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00017-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00017-0)
1746. Zhang, C.; Liu, J.; Wan, Y.; Murty K.G. y Linn, R.J. (2003). *Storage space allocation in container terminals*. Transportation Research B, vol. 37(10): 883–903. DOI: 10.1016/S0191-2615(02)00089-9 · Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/222655966_Storage_space_allocation_in_container_terminals

-
1747. Zhang, X. (2004). *The impact of forecasting methods on bullwhip effect*. International Journal of Production Economics, vol. 88(1): 15–27 Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527303001282>
1748. Zhang, L., Krishnamurthy, A., Malmborg, C.J. y Heragu, S.S. (2009). *Variance-based approximations of transaction waiting times in autonomous vehicle storage and retrieval systems*. European Journal of Industrial Engineering, vol. 3(2): 146-168. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] https://www.researchgate.net/publication/46513853_Variance-based_approximations_of_transaction_waiting_times_in_autonomous_vehicle_storage_and_retrieval_systems
1749. Zhang, M. (2010). *Study on the Relationship between the Development of Port Industry and City Based on Green Conception*. Editado en formato electrónico por Globe Thesis ©. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <http://www.globethesis.com/?t=2189360275453580>.
1750. Zhang, C., Chen, W., Shi, L., and Zheng, L. (2010a). *A note on deriving decision rules to locate export containers in container yards*. European Journal of Operational Research, vol. 205(2): 483-485. Disponible en [fecha de acceso 27.02.2017] <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.12.016>
1751. Zhang, C.; Zheng L.; Zhang Z.; y Armstrong A.J. (2010b). *The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique*. Computers and Industrial Engineering, vol. 58(1): 40-50. DOI: 10.1016/j.cie.2009.08.002. Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.08.002>
1752. Zhang, J.; Yan, X.P.; Chen, X. y Zhang, D. (2011). *Study on the Coordination between Berths and Channels in Tianjin Port*. 1st International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS 2011 © ASCE 2011), pp: 2070-2720. DOI: 10.1061/41177(415)341. Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) https://www.researchgate.net/publication/269081904_Study_on_the_Coordination_between_Berths_and_Channels_in_Tianjin_Port
1753. Zhang, X.; Zeng, Q. y Chen, W. (2013). *Optimization Model For Truck Appointment In Container Terminals*. Presentado en 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013), 13-16 de Agosto de 2013, Shenzhen (China). Publicado en Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol. 96(6): 1938 – 1947. Disponible en (fecha de acceso 12.10.2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.219>

-
1754. Zhang, Y.; Rong, Z. y Liu, Z.-X. (2014). *The Integrated Scheduling Problem in Container Terminal with Dual-Cycle Operation*. International Journal of simulation and modelling, vol. 13(3): 225-347. Disponible en (fecha de acceso 12.12.2016) http://www.ijsimm.com/Full_Papers/Fulltext2014/text13-3_335-347.pdf
1755. Zhang, A.; Zhanga, W.; Chena, Y. y Chenb, G. y Chena, X. (2017). *Approximate the scheduling of quay cranes with non-crossing constraints*. European Journal of Operational Research, vol. 258(3): 820–828. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.021>
1756. Zhao, B. (2009). *Study on Green Contribution of Port to City Based on System Dynamics*. Editado por Economic Papers ©. Recurso en red (115 páginas). Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] <http://www.economics-papers.com/study-on-green-contribution-of-port-to-city-based-on-system-dynamics.html>
1757. Zhao, W. y Goodchild, A. V. (2010). *The impact of truck arrival information on container terminal rehandling*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 46(3): 327-343. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.11.007>
1758. Zhao, N.; Mi, W.J. y Bao, X. (2012). *A Method of Quay Crane Scheduling For Container Terminals*. Advanced Materials Research, vol. 524-527. Páginas: 824-827. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <https://www.scientific.net/AMR.524-527.824>
1759. Zhao, N.; Mi, W.; Mi C. y Chai, J. (2013). *Study on Vessel Slot Planning Problem in Stowage Process of Outbound Containers*. Journal of Applied Sciences, vol. 13(20): 4278-4285. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.10.2016] DOI: [10.3923/jas.2013.4278.4285](https://doi.org/10.3923/jas.2013.4278.4285)
1760. Zhao, X.; Bennell, J.A.; Bektaş, T. y Dowsland, K. (2014). *A comparative review of 3D container loading algorithms*. International Transaction in Operational Research, vol. 23(1-2): 287-320. Disponible en [fecha de acceso 26.10.2016] DOI: [10.1111/itor.12094](https://doi.org/10.1111/itor.12094)
1761. Zhen, L.; Chew, E. P. y Lee, L. H. (2011). *An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs*. Transportation Science, vol. 45(4): 483–504. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.10.2016] https://www.researchgate.net/publication/261974326_An_Integrated_Model_for_Berth_Template_and_Yard_Template_Planning_in_Transshipment_Hubs
1762. Zheng, Q.; Rebennack, S.; Iliadis, N. y Pardalos, P. (2010). *Optimization models in the natural gas industry*. Handbook of Power Systems I, Energy Systems, páginas 121-148.

- Springer Berlin Heidelberg. (Editado por P.M. Pardalos, S. Rebennack, S., M.V.F: Pereira y N. Iliadis). Disponible en [fecha de acceso 15.11.2016] <http://www.rebennack.net/files/papers/ZheRebIliPar10.pdf>
1763. Zhou, Z.; Chan, W.K. y Chow, J.H. (2007). *Agent-based simulation of electricity markets: a survey of tools*. Artificial Intelligence Review, vol. 28(4): 305–342. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ABMElectricMarketSimulators.ZZhouEtAl2007.pdf>
1764. Zhou, P.-f. y Kang, H.-g. (2008). *Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal*. Systems Engineering - Theory & Practice, vol. 28(1): 161 – 169. Disponible bajo petición en [fecha de acceso 26.10.2016] [http://dx.doi.org/10.1016/S1874-8651\(09\)60001-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1874-8651(09)60001-6)
1765. Zhu, Y. y Lim A. (2004). *Crane Scheduling with Spatial Constraints: Mathematical Model and Solving Approaches*. Proceedings 8th International Symposium on Artificial Intelligence and Mathematics (AI&M 1-2004), 4-6 de enero de 2004, Fort Lauderdale (Florida, Estados Unidos). Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://rutcor.rutgers.edu/~amai/aimath04/AcceptedPapers/Zhu-aimath04.pdf>
1766. Zhu, Y. y Lim, A. (2006). *Crane scheduling with non-crossing constraint*. Journal of the Operational Research Society, vol. 57(12): 1464-1471. Disponible en [fecha de acceso 28.01.2017] <http://link.springer.com/article/10.1057%2Fpalgrave.jors.2602110>
1767. Zollinger, H. (1999). *AS/RS application, benefits and justification in comparison to other storage methods: A white paper*. Automated Storage Retrieval Systems Production Section of the Material Handling Industry of America. 24 páginas. Disponible en [fecha de acceso 03.06.2017] <http://www.mhi.org/downloads/industrygroups/asrs/technicalpapers/asrswhitepaper2.pdf>
1768. Zrnić, N. Dj.; Dragović, B. y Radmilović, Z. (1999). *Anchorage-ship-berth link as multiple server queuing system*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 125(5): 232-240. Disponible en [fecha de acceso 05.05.2017] DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1999\)125:5\(232\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:5(232))
1769. Zupick, N. (2016). *Solving Agent Based Problems with Arena*. Arena © Simulation Software. Rockwell Automation. Recurso en línea. Disponible en [fecha de acceso 18.11.2016] <https://www.arenasimulation.com/support/entry/solving-agent-based-problems-with-arena>.